

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS RODRIGUES FIGUEIREDO

**Desenvolvimento de Sistema
Optoeletrônico para Medição de
Proteção Ultravioleta em Óculos de Sol**

São Carlos, 2012

MATHEUS RODRIGUES FIGUEIREDO

Desenvolvimento de Sistema Optoeletrônico para Medição de
Proteção Ultravioleta em Óculos de Sol

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de
Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica

ORIENTADORA: Profa. Dra.
Liliane Ventura

São Carlos, 2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

R471d Rodrigues Figueiredo, Matheus
Desenvolvimento de Sistema Optoeletrônico para
Medição de Proteção Ultravioleta em Óculos de Sol /
Matheus Rodrigues Figueiredo; orientadora Liliane
Ventura. São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. transmitância UV. 2. proteção UV. 3. radiação
UV. 4. ultravioleta. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Matheus Rodrigues Figueiredo

Título: “Desenvolvimento de Sistema Optoeletrônico para Medição de Proteção Ultravioleta em Óculos de Sol”

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 29/11/2012,*

com NOTA 9,0 (nove zeros), pela Comissão Julgadora:

Profa. Associada Liliane Vêntura Schiabel (Orientadora)
SEL/EESC/USP

Prof. Assistente Edson Gesualdo
SEL/EESC/USP

Prof. Associado Evandro Luís Linhari Rodrigues
SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Ao meu pai Francisco Evaldo (in memoriam),
que infelizmente não pode estar presente neste
momento tão feliz da minha vida, mas que não
poderia deixar de dedicar a ele, pois se hoje
estou aqui, devo a ele e por seus ensinamentos e
valores passados. Saudades eternas!

À minha mãe Ana Luísa e ao meu irmão Pedro.
Sei que não mediram esforços pra que este
sonho se realizasse, sem a compreensão, ajuda e
confiança deles nada disso seria possível hoje.

A eles além da dedicatória desta conquista
dedico a minha vida.

Agradecimentos

Agradeço a meu pai, minha mãe e meu irmão, pelo amor e apoio incondicional durante toda a minha vida. Sem eles eu não seria nada.

Aos meus amigos e namorada, pela companhia, apoio e paciência durante a graduação e, em especial, durante este projeto.

Também devo agradecimentos à professora Liliane Ventura, e a Márcio Makiyama Mello, pela incansável colaboração durante todas as etapas de desenvolvimento deste projeto, e, em especial, ao amigo e colaborador Luís Eduardo Lopes pela ajuda inestimável e por estar presente nos momentos mais difíceis.

Agradeço à FAPESP (processo 2011/06079-2) e ao Laboratório de Instrumentação Oftálmica, pelo apoio financeiro deste projeto.

Sumário

RESUMO	19
ABSTRACT	21
1 Introdução	23
1.1 O Olho Humano	24
1.2 A Radiação Ultravioleta	25
1.3 Consequências Da Exposição Do Olho Humano À Radiação UV	26
1.3.1 Catarata	26
1.3.2 Fotoceratite.....	27
1.3.3 Pterígio	27
1.4 Norma Brasileira – NBR 15.111	28
1.5 O Espectrofotômetro CARY 5000	32
2 Materiais e Métodos.....	35
2.1 Sensores	38
2.2 Fonte de luz UV	39
2.3 Amplificador do Sinal	41
2.4 Filtro Passa-Baixas.....	45
2.5 <i>Sample and Hold</i>	48
2.6 Microcontrolador PIC18F4550	50
2.7 Programa Controlador	55
2.8 O <i>Display</i> LCD	58
3 Resultados	61

3.1 Testes de Interface.....	61
3.2 Ótica do Sistema	63
3.3 <i>Offset</i> e Análise em Frequência dos Amplificadores de Transimpedância.....	65
3.4 <i>Offset</i> e Análise em Frequência dos Filtros Passa-Baixas	66
3.5 <i>Offset</i> e Fator de <i>Ripple</i> do Circuito <i>Sample and Hold</i>	68
3.6 <i>Offset</i> Total Do Sistema	69
3.7 Testes de Calibração	69
3.8 Testes em Lentes Oftálmicas	71
4 Discussão	75
4.1 Resolução do Sistema Desenvolvido	75
4.2 Análise da Qualidade do Espectro Obtido	76
4.3 Medidas em Lentes Oftálmicas	78
5 Conclusão.....	81
Referências	82
Apêndice A - Funções Espectrais para o Cálculo da Transmitância do Ultravioleta.....	85

Índice de Figuras

Figura 1-1 Estrutura do olho humano	24
Figura 1-2 Olho com catarata	26
Figura 1-3 Olho com fotoceratite.....	27
Figura 1-4 Olho acometido pelo pterígio.....	28
Figura 1-5 Intensidade de radiação E_s do Sol, função característica espectral relativa S e a função ponderal completa é dada pela equação $W = E_s \cdot S$	31
Figura 1-6 Espectrofotômetro CARY 5000 – VARIAN disponível no LIO	33
Figura 2-1 Diagrama de blocos do sistema desenvolvido	36
Figura 2-2 Diagrama de blocos do sistema eletrônico.....	37
Figura 2-3 Fotodiodo da SGLux	38
Figura 2-4 Resposta do fotodiodo.....	39
Figura 2-5 Lâmpadas da Philips	39
Figura 2-6 Gabinete construído para fixação das lâmpadas	40
Figura 2-7 Esquema elétrico do amplificador utilizado.....	41
Figura 2-8 Placa do amplificador.....	42
Figura 2-9 Amplificador operacional OPA2333	43
Figura 2-10 Potenciômetro digital MCP41050.....	44
Figura 2-11 Parâmetros de transmissão de um filtro passa-baixas genérico	46
Figura 2-12 Estrutura básica de um filtro passa baixas de topologia Sallen Key.....	47
Figura 2-13 Circuito simulado no LTspice.....	48
Figura 2-14 Sinal de saída do filtro passa-baixas	48
Figura 2-15 Circuito do detector de pico	49
Figura 2-16 Formas de onda de entrada e de saída do circuito detector de pico	50
Figura 2-17 Microcontrolador e LCD.....	51
Figura 2-18 Diagrama dos pinos do PIC18F4550	52
Figura 2-19 Conexão dos pinos para gerar o <i>clock</i> do microcontrolador.....	53
Figura 2-20 Circuito <i>debounce</i>	54
Figura 2-21 Fluxograma do programa embarcado	57
Figura 3-1 Tela 1 do sistema.....	61
Figura 3-2 Tela 2 do sistema.....	62
Figura 3-3 Tela 3 do sistema.....	62

Figura 3-4 Tela 4 do sistema.....	62
Figura 3-5 Tela 5 do sistema.....	62
Figura 3-6 Tela 6 do sistema.....	62
Figura 3-7 Tela 7 do sistema.....	62
Figura 3-8 Espectro emitido pela lâmpada emissora de UVA.....	63
Figura 3-9 Espectro emitido pela lâmpada emissora de UVB.....	64
Figura 3-10 Espectro emitido pela associação das lâmpadas	64
Figura 3-11 Saída do amplificador de transimpedância com a entrada em aberto	65
Figura 3-12 Análise em frequência dos amplificadores, variando-se o valor do potenciômetro digital.....	66
Figura 3-13 Offset e ruído dos filtros utilizados.....	67
Figura 3-14 Resposta em frequência do filtro, simulada no Ltspice	67
Figura 3-15 <i>Offset</i> e ruído do <i>sample and hold</i> utilizado	68
Figura 3-16 Fator de ondulação <i>sample and hold</i> utilizado.....	68
Figura 3-17 Sinal de entrada do detector de pico (azul) e o sinal de saída (amarelo)	69
Figura 3-18 Resultados dos testes em lentes oftálmicas 	72
Figura 3-19 Resultados dos testes de repetibilidade da medida de transmitância	73
Figura 4-1 Resposta do sensor à fonte de luz incorporada ao sistema.....	76
Figura 4-2 Intensidade de radiação E_s do Sol, função característica espectral relativa S e a função ponderal completa é dada pela equação $W = E_s \cdot S$	77
Figura 4-3 Comparação da função ponderação presente na norma com a obtida pelo sistema	77

Índice de Tabelas

1-1 Valor da transmitância UV para filtros de proteção solar de uso geral	31
2-1 Funções dos pinos do OPA2333.....	43
2-2 Funções dos pinos do MCP41050	44
2-3 Conexão do display LCD JHD204A com o PIC 18F4550.....	53
2-4 Funções dos pinos do display JHD 204A.....	58
3-1 Teste de repetibilidade da calibração	70
3-2 Transmmitância UVA e UVB de lentes dos óculos de sol testados.....	71
3-3 Testes de repetibilidade	73

Lista de Abreviações e Siglas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;

AMP. OP.: Amplificador operacional;

CIE: Comissão Internacional de Iluminação;

ICNIRP: Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não Ionizantes;

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia;

SOMPUOS: Sistema Optoeletrônico de Medição de Proteção Ultravioleta em Óculos de Sol;

UV: Ultravioleta;

UVA: Ultravioleta A;

UVB: Ultravioleta B.

RESUMO

De acordo com a Norma Brasileira, NBR 15.111 (2004) é necessário que as lentes de óculos de sol protejam contra radiações ultravioletas (UV) A e B, sendo que para cada categoria (grau de escurecimento da lente) é definida uma transmitância máxima do total destas radiações. O objetivo desse Trabalho de Conclusão de Curso é desenvolver um sistema capaz de oferecer ao usuário leigo o poder de realizar a medida de transmitância de radiações UVA e UVB nas lentes de seus óculos de sol. Além de abranger todo espectro UV, o sistema desenvolvido aprimorou a eletrônica de controle em relação ao sistema já existente no Laboratório de Instrumentação Oftálmica (LIO). O Sistema Optoeletrônico para Medição de Proteção Ultravioleta em Óculos de Sol (SOMPUOS) constitui-se de: fonte emissora de radiação UV; dois sensores fotodiodos sensíveis à radiação UV: um deles é o sensor de referência e o outro é o sensor de medida; amplificação, condicionamento e processamento do sinal; controle do sistema e interface para o usuário. O SOMPUOS apresenta resolução de 0,1%. A qualidade do espectro obtido foi quantificada a partir de duas métricas, erro quadrático médio $RMS_{ERROR} = 0,0913$ e coeficiente de aderência $GFC = 0,9664$ calculados em relação ao espectro normalizado. Testes em 15 óculos de sol foram realizados e comparados com o espectrofotômetro Cary 5000 – VARIAN, obtendo um fator de correlação de $r^2 = 0,9852$. Esse sistema foi construído em bancada e deverá ser adaptado a um totem desenvolvido pelo LIO, que atualmente realiza apenas medidas de transmitância UVA.

Palavras-chave: transmitância UV, proteção UV, radiação UV, ultravioleta.

ABSTRACT

According to the Brazilian Standard, NBR 15.111 (2004) it is necessary that sunglasses lenses protect against A and B ultraviolet (UV) radiation, being that for each category (darkness of the lens) it is established maximum value of UV transmittance. The objective of this work is to develop a system capable of offering to the lay user the possibility of measuring the UVA and UVB transmittance of his sunglasses lenses. In addition to embracing the complete UV spectrum, the developed system improved the electronic control, if compared to the system that already exists at the Ophthalmic Instrumentation Laboratory (LIO). The Optoelectronic System for Measuring UV Transmittance on Sunglasses (SOMPUOS) consists of: UV emitting source; two UV sensible photodiodes: one is the baseline sensor while the other is the measuring sensor; signal amplification, conditioning and processing; system control and users interface. The SOMPUOS presents a resolution of 0,1%. The quality of the spectrum obtained was quantified based on two metrics, root mean square error, $RMS_{ERROR} = 0,0913$ and adhesion coefficient $GFC = 0,9664$ calculates in relation to the standardized spectrum. Tests were made on 15 sunglasses and the results compared to the results of the Cary 5000 – VARIAN spectrophotometer, achieving a correlation factor of $r^2 = 0,9852$. This system was built in the laboratory and will be adapted to the totem developed by LIO, which nowadays measures only UVA transmittance.

Keywords: UV transmittance, UV protection, UV radiation, ultraviolet.

1 Introdução

Óculos escuros são utilizados com as intenções de reduzir o ofuscamento causado pela radiação solar e de proteger os olhos contra os possíveis danos que podem ser causados pela exposição à radiação UV proveniente do Sol.

Existem fortes indícios de que a exposição à radiação UV pode causar danos como: queimadura da pálpebra, fotoceratite, pterígio, pingüecula ceratopatia de Labrador, polimegatismo endotelial, catarata, dentre outros (CAMERON, 1965; COGAN e KINSEY, 1946; MORAN e HOLLOWS, 1984; SLINEY, 1986; TAYLOR, 1980; TAYLOR, 1989).

O objetivo desse projeto é desenvolver um sistema capaz de medir transmitância de radiações UVA e UVB através de uma lente de óculos escuros, sendo este seu principal diferencial em relação a outros equipamentos desenvolvidos anteriormente no Laboratório de Instrumentação Oftálmica (LIO), os quais realizavam a medição apenas de transmitância na faixa UVA. O sistema deve determinar com precisão, baseado na norma brasileira NBR 15.111 (ABNT, 2004), a porcentagem de radiação UVA e UVB transmitida pela lente. Tal precisão foi avaliada através da comparação dos resultados obtidos com o sistema desenvolvido e o espectrofotômetro CARY 5000 da VARIAN presente no LIO.

Vale ressaltar que o aparelho desenvolvido não é destinado à certificação, mas somente para testes de verificação de proteção de óculos escuros, acessível à população geral e que pode estar disponível nos mais diversos espaços públicos.

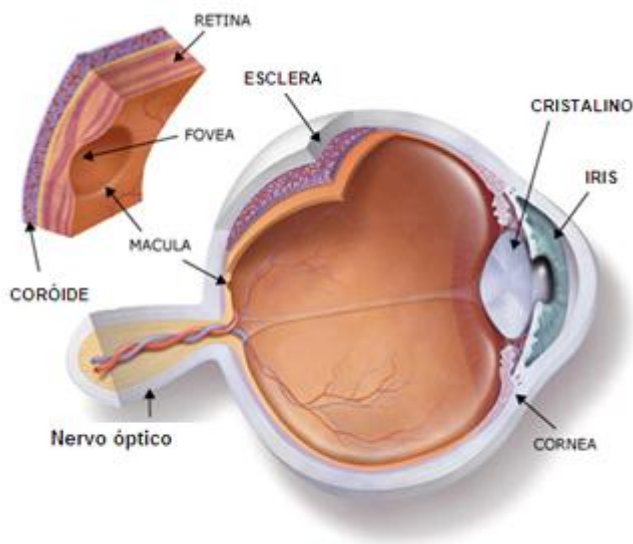
Para a melhor compreensão do tema, o olho humano e os assuntos relacionados às radiações UVA e UVB serão descritos, sucintamente, a seguir.

1.1 O Olho Humano

O cérebro humano interpreta os sinais elétricos provenientes do nervo óptico, possibilitando, aos humanos, reconhecer formas e cores através da visão (SOBOTTA, 2012).

O olho é o órgão responsável pela captação da luz refletida pelos objetos à nossa volta. O caminho percorrido pela luz dentro do olho começa pela córnea, que é um tecido transparente que cobre nossa íris e é onde se dá a primeira refração da luz dentro do olho. Em seguida, a luz passa pelo humor aquoso, penetra no globo ocular através da pupila e atinge o cristalino, que funciona como uma lente de focalização. O cristalino faz com que os raios luminosos converjam para um ponto focal sobre a retina. Na retina, mais de cem milhões de células fotossensíveis transformam a luz em impulsos eletroquímicos, que são enviados ao cérebro pelo nervo óptico. No cérebro, mais precisamente no córtex visual, ocorre o processamento das imagens recebidas pelo olho direito e esquerdo completando então nossa sensação visual. A figura 1-1 representa as estruturas citadas.

Figura 1-1 Estrutura do olho humano



Fonte: <http://www.institutoderetina.com.br/>

A íris é a parte que dá cor ao olho e onde está localizada a pupila. A pupila é um orifício que tem a capacidade de variar seu diâmetro de abertura, dilatando-se ou contraindo-se involuntariamente de acordo com a variação da luminosidade do ambiente. A coróide envolve a íris se estendendo até a parte posterior da retina (CASTRO, 1985).

O cristalino é a lente que focaliza os raios luminosos na retina. Essa lente pode ser ajustada com o auxílio dos músculos ciliares, variando assim seu ponto focal, a fim de que seja possível a focalização de objetos que estejam próximos ou distantes. O poder de ajuste dos músculos ciliares diminui com o envelhecimento do ser humano, assim como o cristalino pode se tornar opaco (doença denominada catarata).

A retina é a parte posterior do olho e contém cerca de 120 milhões de fotoreceptores (cones e bastonetes) que liberam moléculas neurotransmissoras a uma taxa inversamente proporcional a luminosidade do ambiente. É onde se forma a imagem que será interpretada pelo cérebro.

O nervo óptico capta as informações através dos cones e bastonetes presentes na retina e as envia ao lóbulo occipital do cérebro onde é processada a informação, gerando resultados de cor, forma, tamanho, distância e noções de espaço.

Ainda há controvérsias, mas alguns estudos indicam que a radiação ultravioleta pode causar danos às partes constituintes do olho humano citadas anteriormente. Tais danos serão abordados posteriormente neste trabalho, a fim de enfatizar a importância de uma proteção ultravioleta adequada em lentes de óculos escuros (CAMERON, 1965; COGAN e KINSEY, 1946; MORAN e HOLLOWS, 1984; SLINNEY, 1986; TAYLOR, 1980; TAYLOR, 1989).

1.2 A Radiação Ultravioleta

O intervalo do espectro eletromagnético com comprimentos de onda menores que o da luz visível e maiores que os dos raios X é compreendido pela radiação ultravioleta (HECHT, 1990).

Na discussão dos efeitos biológicos da radiação ultravioleta, a Comissão Internacional em Iluminação(CIE) dividiu o espectro UV em três bandas. A banda entre 315 e 380-400 nm é designada UVA, de 280 a 315 nm UVB e de 100 a 280 nm UVC (CIE, 1987). Comprimentos de onda inferiores a 280 nm são de pouca importância biológica já que são absorvidas imediatamente pela camada de ozônio da atmosfera (ICNIRP, 2004).

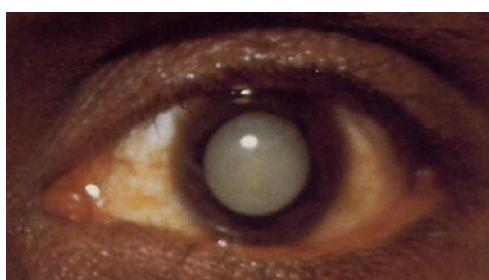
1.3 Consequências Da Exposição Do Olho Humano À Radiação UV

Existem inúmeros estudos que indicam que a radiação ultravioleta pode causar danos às partes constituintes do olho humano. Alguns desses danos serão descritos em seguida.

1.3.1 Catarata

A catarata é uma patologia ocular que consiste na opacidade parcial ou total do cristalino. Pode ser decorrente de diversas causas como traumatismo, *Diabetes Mellitus*, uso de medicamentos, dentre outros. Tipicamente, apresenta-se como turvação visual progressiva que pode culminar em cegueira ou visão subnormal.

Figura 1-2 Olho com catarata



Fonte: <http://oftalmologiacampobelo.site.med.br/>

Na formação da catarata, um número de fatores ambientais estão envolvidos. Os dois que recebem maior atenção são a radiação ultravioleta e a temperatura do meio.

Comprimentos de onda maiores que 295 nm passam a córnea e são absorvida pelo cristalino (ICNIRP, 2004). Sliney, em seu estudo *Physical Factors in Caractogenesis*:

Ambient Ultraviolet Radiation and Temperature, analisou o intervalo entre 295-320 nm (conhecido como UVB) concluindo que com toda a probabilidade, a radiação UV e a temperatura desempenham papéis importantes no desenvolvimento da catarata. No entanto, radiação UV evidenciou ter maior influência, gerando a necessidade de proteção UV em óculos de sol (SLINEY, 1986).

1.3.2 Fotoceratite

Fotoceratite é a ceratite (inflamação e alteração da córnea) ocasionada pelo excesso de exposição à luz, que pode ou não ser solar. Acomete também pessoas que passam muitas horas seguidas expostas à radiação. Clinicamente, 12 à 24 horas depois da exposição à radiação, o paciente se queixa de muita dor no olho e da impossibilidade de abrir os olhos pelo incômodo provocado pela luz (fotofobia).

Figura 1-3 Olho com fotoceratite



Fonte: <http://www.theeyecarecompany.com.au/>

Comprimentos de onda curtos, entre 280 nm e 320 nm, são absorvidos pela córnea e pela conjuntiva do olho (COGAN e KINSEY, 1946). Exposição excessiva à essa faixa de comprimento de onda causa fotoceratite (ICNIRP, 2004).

1.3.3 Pterígio

O pterígio é uma membrana fibro-vascular que cresce sobre a córnea. Esta membrana é muito parecida com a conjuntiva, a qual é a membrana que recobre a esclera (a parte branca do olho) e a parte interna das pálpebras.

A membrana que invade a córnea, contém vasos sanguíneos e tecido fibroso podendo prejudicar a visão, causar perda da transparência da córnea (leucoma) e distorção da curvatura

corneana (astigmatismo). Frequentemente, o pterígio também causa ardência, prurido, sensação de areia nos olhos, lacrimejamento, fotofobia e hiperemia ocular.

Figura 1-4 Olho acometido pelo pterígio



Fonte: www.eyeswidebay.com.au

O aparecimento do pterígio pode estar relacionado com fatores genéticos e com fatores ambientais. Dos fatores ambientais, a exposição solar, o vento e a poeira são os mais relevantes no aparecimento do pterígio.

Foi mostrado que pessoas que trabalham ao ar livre têm um risco aproximadamente três vezes maior de desenvolver pterígio (TAYLOR, 1989). A relação entre pterígio e pinguécula e radiação UVB foi bem estabelecida em estudos (CAMERON, 1965; TAYLOR, 1980; MORAN e HOLLOWS, 1984).

1.4 Norma Brasileira – NBR 15.111

Um trecho da introdução da norma brasileira NBR 15.111(2004), que trata de parâmetros para certificação de óculos de sol, está reproduzido abaixo.

A ABNT NBR 15111 foi elaborada no Comitê Brasileiro de Óptica e Instrumentos Ópticos (ABNT/CB-49), pela Comissão de Estudo de Armações e Solares (CE-49:000.03). O Projeto circulou em Consulta Pública conforme Edital nº 11 de 28.11.2003, com o número Projeto 49:000.03-009.

Esta Norma é baseada na EN 1836:1997, incluindo a Emenda de 2001. (ABNT, 2004, p. 1)

Esta Norma estabelece as características físicas (mecânicas, ópticas etc.) para óculos de sol e filtros de proteção solar com potência nominal nula, que sejam lentes para óculos corretivos, mas previstos para uso geral na proteção contra radiações solares e também para uso social e doméstico, inclusive no trânsito.

Esta Norma não é válida quando se trata de proteção dos olhos contra a radiação de fontes de luz artificial, como as fontes artificiais de luz (simulador solar), por exemplo. A estes filtros aplica-se a EN 170.

Esta Norma não se aplica para óculos de esqui (para os quais é aplicada a EN 174), nem para outros dispositivos de proteção dos olhos destinados a atividades recreativas. (ABNT, 2004, p. 2)

A norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT estabelece 11 diferentes tipos de testes para homologação de óculos solares. São determinados requisitos dos óculos de sol como um todo, ou seja, requisitos gerais para as armações com lentes montadas, qualidade dos materiais empregados e requisitos de resistência mecânica. Referindo-se aos filtros (lentes dos óculos de sol), são definidos testes de transmitância e categoria de filtros; são estabelecidos requisitos gerais da transmitância (como homogeneidade); requisitos para transitar ou dirigir; características da transmitância espectral; estudo de reconhecimento das luzes de sinalização; são estabelecidos também requisitos especiais da transmitância para filtros fotocromáticos; limites para transmitância de radiação ultravioleta e infravermelho; potência óptica de lentes; difusão da luz; qualidade do material e da superfície; resistência mecânica, estabelecendo um parâmetro mínimo aceitável; resistência à radiação e, também, um tópico relacionado à inflamabilidade..

A proposta de trabalho foi desenvolver um sistema, denominado Sistema Optoeletrônico para Medição de Proteção Ultravioleta em Óculos de Sol (SOMPUOS) para medidas de transmitância ultravioleta em óculos de sol que deverá ser inserido em um totem que realizará, ainda, a medida da categoria da lente, da transmissão de raios infravermelhos e realiza os testes semafóricos na lente, baseados na norma NBR 15.111 (ABNT, 2004). De acordo com a categoria dos óculos, o requisito de proteção ultravioleta da lente varia e o teste realizado pelo SOMPUOS mede a transmitância UV da lente para que a lente seja posteriormente diagnosticada, se é apropriada ou não para uso humano. Además, estão sendo desenvolvidos paralelamente, no Laboratório de Instrumentação Oftálmico - LIO, sistemas que contemplam os outros aspectos da norma brasileira.

A transmitância do ultravioleta solar (τ_{SUV}) representa o valor médio da transmitância espectral no intervalo de comprimento de onda entre 280 nm e 380 nm, calculado com a intensidade de radiação $E_{s\lambda}(\lambda)$ do Sol ao nível do mar e massa de ar 2 e $S(\lambda)$, que é a função característica espectral relativa para radiação ultravioleta. Todas essas variáveis, com exceção da $\tau_F(\lambda)$, estão tabeladas na norma (ABNT, 2004) e são dadas no Apêndice A. A função

ponderal completa é dada pela equação $W(\lambda) = E_{s\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda)$. Seguindo a divisão do espectro eletromagnético dada pela Comissão Internacional em Iluminação (CIE, 1987), a norma NBR 15.111 estabelece as equações utilizadas para o cálculo das transmitâncias total (1), UVA (2) e UVB (3).

$$\tau_{\text{SUV}} = \frac{\int_{280\text{nm}}^{380\text{nm}} \tau_F(\lambda) \cdot E_{s\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{280\text{nm}}^{380\text{nm}} E_{s\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\int_{280\text{nm}}^{380\text{nm}} \tau_F(\lambda) \cdot W_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{280\text{nm}}^{380\text{nm}} W_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (1)$$

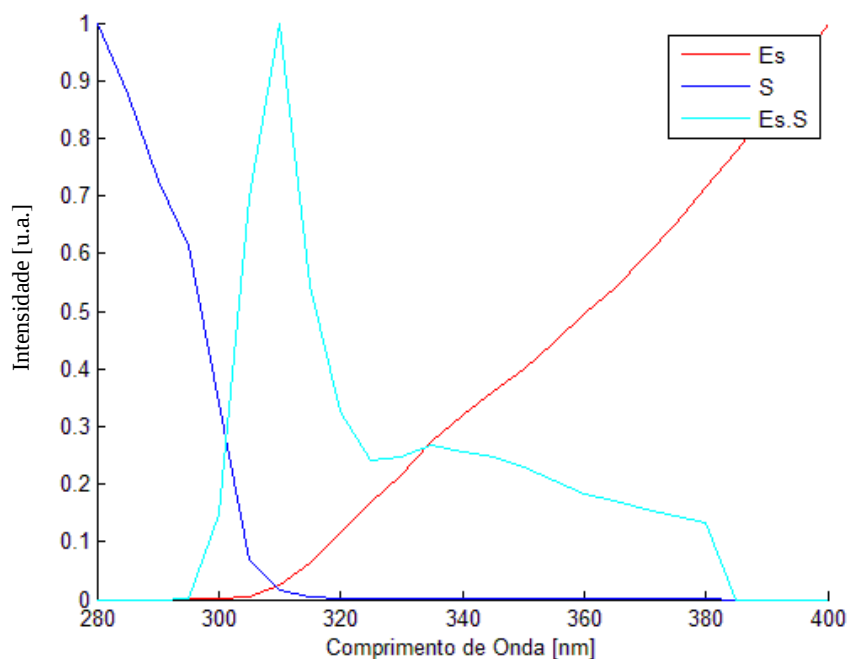
$$\tau_{\text{SUV A}} = \frac{\int_{315\text{nm}}^{380\text{nm}} \tau_F(\lambda) \cdot E_{s\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{315\text{nm}}^{380\text{nm}} E_{s\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\int_{315\text{nm}}^{380\text{nm}} \tau_F(\lambda) \cdot W_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{315\text{nm}}^{380\text{nm}} W_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2)$$

$$\tau_{\text{SUV B}} = \frac{\int_{280\text{nm}}^{315\text{nm}} \tau_F(\lambda) \cdot E_{s\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{280\text{nm}}^{315\text{nm}} E_{s\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\int_{280\text{nm}}^{315\text{nm}} \tau_F(\lambda) \cdot W_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{280\text{nm}}^{315\text{nm}} W_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3)$$

Onde $\tau_F(\lambda)$ é a transmitância espectral dos filtros de proteção solar. A $S(\lambda)$ é também chamada de curva de ação eritêmica, por se tratar de uma função que pondera o espectro solar no ultravioleta em função da capacidade de determinado comprimento de onda provocar a eritema, ou seja, vermelhidão na pele.

Assim, buscou-se através de uma associação das lâmpadas obter uma resposta espectral próxima à calculada $E_{s\lambda}(\lambda) \times S(\lambda)$, como apresenta-se na figura 1-5.

Figura 1-5 Intensidade de radiação E_s do Sol, função característica espectral relativa S e a função ponderal completa é dada pela equação $W = E_s \cdot S$



Fonte: NBR 15.111 (ABNT,2004)

As lentes são classificadas em categorias que indicam a faixa de valor da transmitância luminosa da lente para região de espectro visível de luz. Existem cinco categorias de óculos, apresentadas na Tabela 1-2. Nesta tabela também estão apresentados os requisitos de transmitâncias na faixa UV do espectro solar.

Tabela 1-1 Valor da transmitância UV para filtros de proteção solar de uso geral

Categoria da lente	Redução Solar	Região Visível do Espectro de Transmitância Luminosa (T_v)	Transmitância Permitida no UV		
			280nm -315nm UVB	315nm -350nm UVA	350nm -380nm UVA
0	Pouca	80% - 100%	0,1 T_v	T_v	T_v
1	Baixa	43% - 80%			
2	Média	18% - 43%		0,5 T_v	0,5 T_v
3	Alta	8% - 18%			
4	Muito alta	3% - 8%			

Fonte: NBR 15111 (ABNT, 2004)

De acordo com a norma NBR 15.111 (ABNT, 2004), a transmitância luminosa de um filtro (lente) é calculado da seguinte forma:

Para a determinação da transmitância luminosa, utilizar a distribuição do iluminante-padrão D65 e os valores espectrais do observador colorimétrico 2° de referência CIE 1931, de acordo com a ISO/CIE 10526. (ABNT, 2004, p. 13)

O cálculo transmitância luminosa, é feito a partir da equação 4.

$$\tau_V = \frac{\int_{380nm}^{780nm} \tau_F(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot S_{D65}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} V(\lambda) \cdot S_{D65}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (4)$$

Onde $V(\lambda)$ é a a função da visibilidade espectral para a visão com luz diurna.

Quanto mais escura a lente, maior a dilatação da pupila e, conseqüentemente, menor deverá ser a transmitância ultravioleta. (INMETRO, 2012)

Não faz parte do SOMPUOS, a caracterização da categoria das lentes testadas, apenas o cálculo do valor da transmitância UV. No entanto, é importante expor e explicar tais conceitos, essenciais para que seja entendida a finalidade do sistema desenvolvido.

1.5 O Espectrofotômetro CARY 5000

Para estabelecer o grau de precisão para o SOMPUOS, foram testadas posteriormente lentes com diferentes valores de transmitância para a faixa UV do espectro luminoso, tanto no espectrofotômetro Cary 5000, quanto no próprio SOMPUOS. Os valores de transmitância, medidos em ambos, foram comparados, a fim de se estabelecer o quão próximo está o SOMPUOS de um sistema de alta precisão, como é o espectrofotômetro em questão.

O Cary 5000 é um espectrofotômetro UV-Vis-NIR, aparelho científico de alto desempenho fotométrico dentro da faixa 175 a 3300 nm. Controlado pelo software Cary WinUV, compatível com o sistema operacional Windows, facilita a análise com alta precisão e um número de acessórios. Dentro do compartimento de amostragem do Cary 5000, é

possível colocar acessórios grandes, lentes, esferas integradoras, entre outros. O Cary 5000 – VARIAN está apresentado na figura 1-6.

Figura 1-6 Espectrofotômetro CARY 5000 – VARIAN disponível no LIO



Fonte: Manual do fabricante

No próximo capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do SOMPUOS.

2 Materiais e Métodos

O SOMPUOS utiliza, em sua composição, dois sensores UV, da fabricante SGlux, que respondem à excitação ultravioleta, e uma associação de duas lâmpadas, da fabricante Philips, uma que emite radiação UVB e a outra emissora de radiação UVA.

Um dos sensores realiza a medida referência (linha de base), ou seja, a resposta do sensor à fonte de luz sem nenhum anteparo e o outro mede intensidade da luz ultravioleta, que atravessa as lentes dos óculos. O cálculo da transmitância relativa das lentes é realizado comparando a resposta do sensor de referência com a resposta do sensor de medição. Por se tratar de lâmpadas fluorescentes, utilizam-se dois sensores com a finalidade de anular flutuações na intensidade luminosa, que geram ruídos.

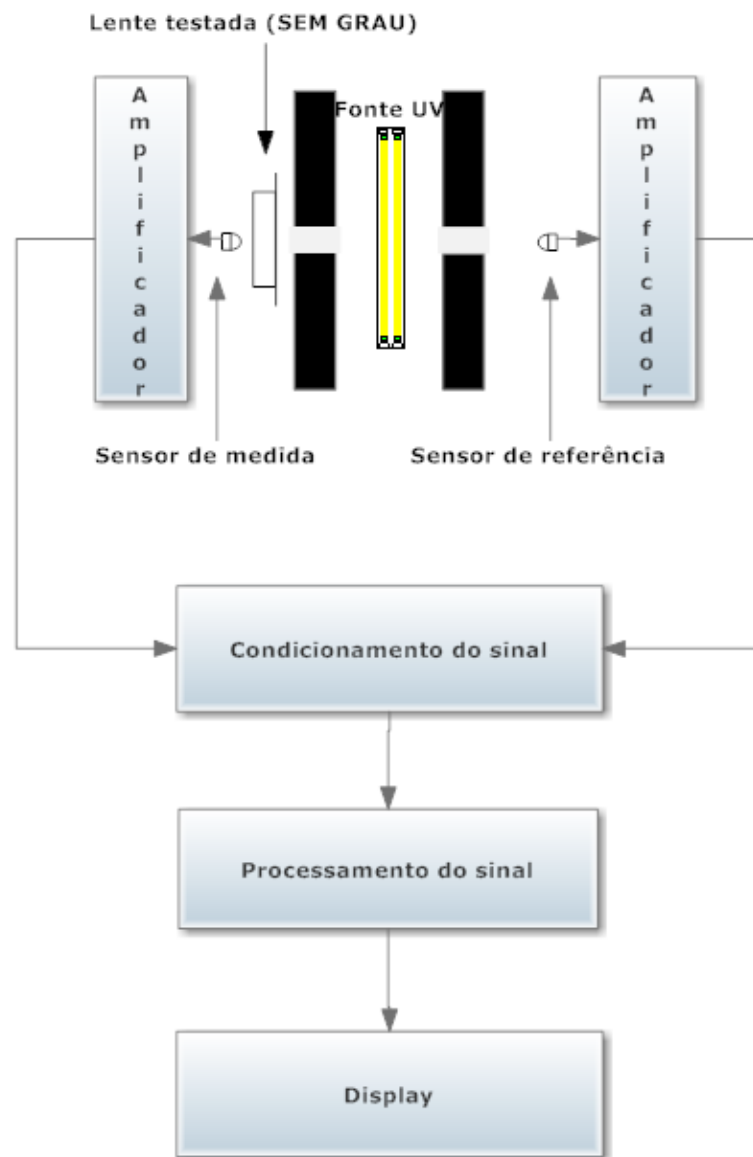
O conjunto de lâmpadas utilizado caracteriza uma fonte de luz extensa e, portanto, são utilizados obturadores de forma que uma quantidade suficiente de luz chegue até os sensores.

Todas as placas utilizadas no sistema foram blindadas com o uso de películas de alumínio a fim de evitar ruídos vindos dos reatores das lâmpadas e da rede.

Os mecanismos descritos anteriormente, uso do sensor de referência, obturador e blindagem, garantem a robustez do sistema, que realiza medidas pouco susceptíveis tanto a ruídos externos, como oscilações da rede elétrica, fontes luminosas externas, dentre outros, como a ruídos inerentes ao sistema, como flutuações da emissão da lâmpada.

O SOMPUOS foi desenvolvido conforme a apresentação em diagrama de blocos da figura 2-1.

Figura 2-1 Diagrama de blocos do sistema desenvolvido



Fonte: Autor

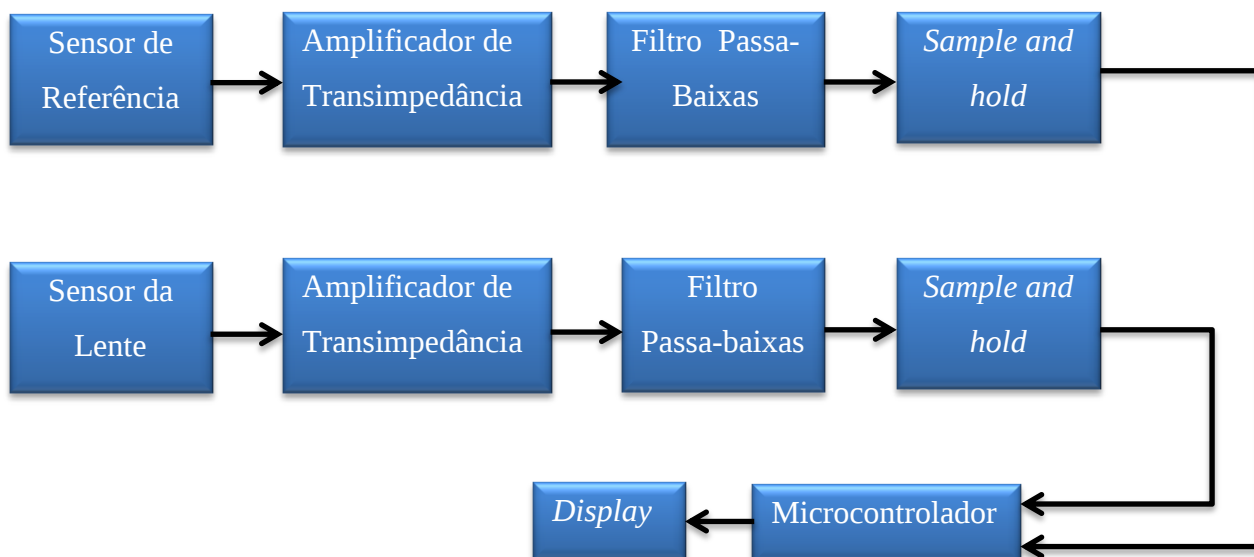
O fotodiodo é uma junção semicondutora que converte a energia luminosa dos fótons em uma corrente elétrica. Esse fenômeno ocorre devido ao efeito fotoelétrico, que consiste na criação de pares elétron-buraco em materiais (GRAEME, 1996). Os fotodiodos têm como característica a proporcionalidade entre a intensidade da luz na junção semicondutora e a

corrente nos terminais do componente, que os permite operar como sensores de intensidade luminosa.

Os sensores são fotodiodos e, portanto, é necessária a utilização de amplificadores de transimpedância para leitura dos sinais de saída. Depois de amplificados, os sinais passam através de um filtro passa-baixas e posteriormente de um circuito *sample and hold*. Os sinais resultantes são então convertidos em valores digitais pelo conversor A/D do microcontrolador PIC 18F4550, também utilizado na composição do sistema. Após o processamento dos sinais no microcontrolador, os resultados são exibidos no *display*.

O diagrama de blocos da parte eletrônica do SOMPUOS é mostrado na figura 2-2.

Figura 2-2 Diagrama de blocos do sistema eletrônico



Fonte: Autor

A seguir serão discutidos detalhadamente os componentes utilizados no desenvolvimento do SOMPUOS.

2.1 Sensores

Para realização de testes em concordância com a norma NBR 15.111 (ABNT, 2004), deve ser analisada a transmitância das lentes num intervalo que vai de 280 nm a 380 nm – correspondente às faixas de radiação UVA e UVB. Não é necessário realizar testes para comprimentos de onda inferiores a 280 nm – radiação UVC -, já que esses são absorvidos imediatamente pela atmosfera (camada de ozônio), quando penetram na superfície terrestre (ICNIRP, 2004). Portanto, o SOMPUOS utiliza em sua composição dois fotodiodos (sensores), da fabricante SGLUX (figura 2-3) capazes de responder à excitação ultravioleta num intervalo de comprimento de onda entre 200nm e 405nm, aproximadamente. Os critérios levados em consideração na escolha desses sensores foram: a forma curva de resposta que, juntamente com a fonte de luz resulta em um espectro similar ao da norma, a faixa de operação, a propriedade de ser pouco sensível à luz visível, a alta velocidade de resposta, alta sensibilidade na região espectral necessária para o sistema e baixo ruído, possibilitando assim a medição de baixas intensidades de radiação UV.

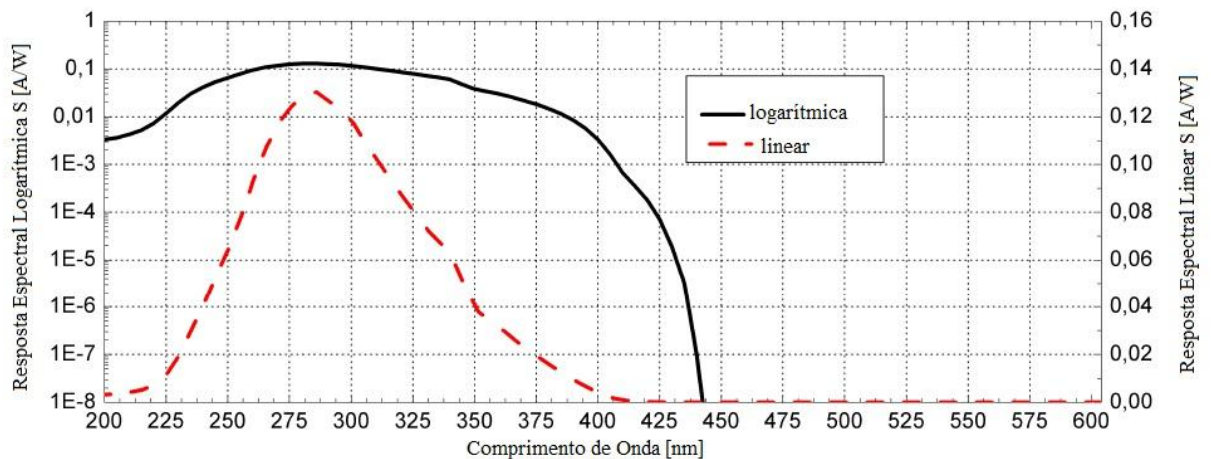
Figura 2-3 Fotodiodo da SGLux



Fonte: Autor

A figura 2-4 apresenta a curva de resposta do diodo, onde pode-se analisar a corrente de saída em função da potência e do comprimento de onda eletromagnética incidente.

Figura 2-4 Resposta do fotodiodo



Fonte: Manual do fabricante

A razão pela qual o sistema é composto por dois fotodiodos é a de garantir a precisão das medidas realizadas tornando-as pouco susceptíveis a ruídos inerentes ao sistema, como flutuações da emissão da lâmpada, já que a resposta do sensor de medição é sempre comparada à resposta do sensor de referência, anulando portanto o efeito das flutuações da rede.

2.2 Fonte de luz UV

Para obter um espectro de acordo com a norma brasileira, foi utilizada uma associação de duas lâmpadas emissoras de radiação UVA e UVB. As lâmpadas são de fabricação da empresa Philips podem ser vistas na figura 2-5.

Figura 2-5 Lâmpadas da Philips



Fonte: Autor

É necessário que os feixes de luz que atingem os sensores sejam idênticos, isto é, tenham mesma intensidade e espectro eletromagnético. Por esta razão, o alinhamento da ótica do sistema é extremamente crítico para as medidas. Um gabinete de *nylon* preto foi construído para manter o correto posicionamento das lâmpadas e, também, evitar o espalhamento da radiação UV.

Figura 2-6 Gabinete construído para fixação das lâmpadas



Fonte: Autor

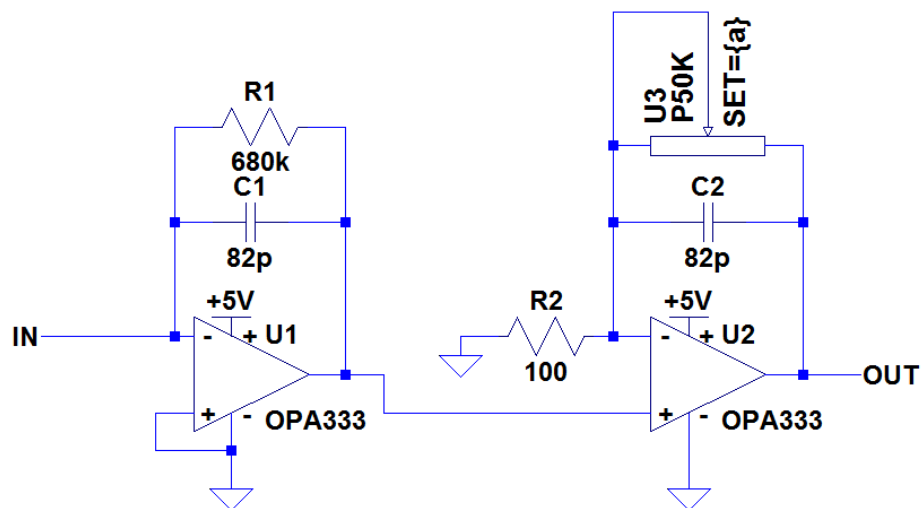
A fonte UV foi alinhada de maneira ortogonal e equidistante de ambos os sensores, ficando um na parte superior do gabinete que contém as lâmpadas e o outro posicionado simetricamente na parte inferior, com a finalidade que os dois ficassem na mesma região que emite a radiação e recebessem a mesma intensidade de luz. Foi também construído um invólucro de *nylon* preto para fixar os sensores corretamente.

2.3 Amplificador do Sinal

O sinal proveniente dos fotodiodos é uma corrente de intensidade muito baixa, da ordem de 300 nA. O correto condicionamento desse sinal é de grande importância para que possam ser realizadas medidas confiáveis no sistema. Dessa forma, o condicionamento é feito antes de transmiti-lo ao microcontrolador.

Para realizar a amplificação do sinal, foi utilizado, neste projeto, um amplificador de dois estágios. É possível visualizar o circuito elétrico do amplificador projetado na figura 2-7.

Figura 2-7 Esquema elétrico do amplificador utilizado

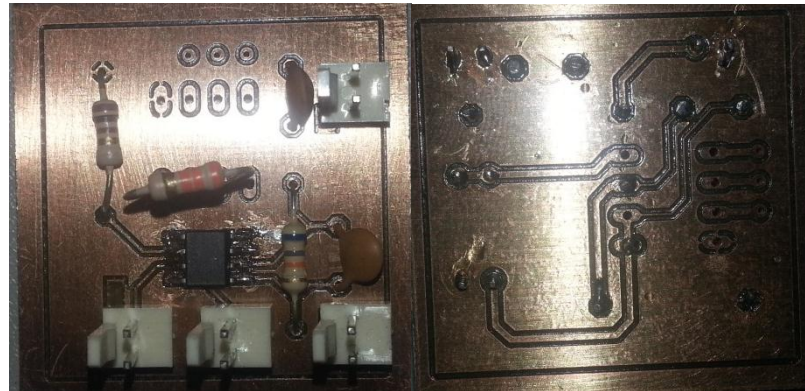


Fonte: Autor

O primeiro estágio desse amplificador é um amplificador inversor de transimpedância (pois o sinal proveniente do sensor é negativo), que converte um sinal de corrente em um sinal de tensão. O segundo estágio é um amplificador de tensão de entrada não-inversora. Como o

ganho global necessário para amplificar o sinal proveniente dos sensores é muito alto, essa topologia foi escolhida com a finalidade de reduzir os possíveis efeitos de ruído e *offset* que são comuns a amplificadores convencionais de alto ganho com resistência de realimentação muito alta. Na figura 2-8 é possível observar a placa montada.

Figura 2-8 Placa do amplificador

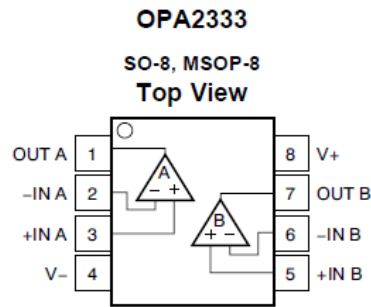


Fonte: Autor

Os resistores foram selecionados de forma experimental, com o intuito de obter o ganho necessário e, ao mesmo tempo, manter um valor de *offset* baixo.

Foi utilizado o amplificador do circuito integrado OPA2333, um dispositivo *dual channel*, que possibilita implementar os dois estágios de amplificação utilizando apenas um *chip*. A série OPA333 tem um recurso de autocalibração que fornece uma tensão de *offset* muito baixa ($10\mu\text{Vpp}$ max) e uma baixa variação com a temperatura. Além disso, oferece alta impedância de entrada e uma excursão de saída de apenas 50mV abaixo da tensão de alimentação (dados retirados do *datasheet*). Pode-se observar a topologia do OPA2333 na figura 2-9.

Figura 2-9 Amplificador operacional OPA2333



Fonte: Manual do fabricante

Os pinos possuem as funções, descritas no Tabela 2-1.

Tabela 2-1 Funções dos pinos do OPA2333

Número do pino	Nome do pino	Função do pino
1	OUT A	Saída do estágio A
2	-IN A	Entrada inversora do estágio A
3	+IN A	Entrada não-inversora do estágio A
4	V-	<i>Ground</i>
5	+IN B	Entrada não-inversora do estágio B
6	-IN B	Entrada inversora do estágio B
7	OUT B	Saída do estágio B
8	V+	Alimentação

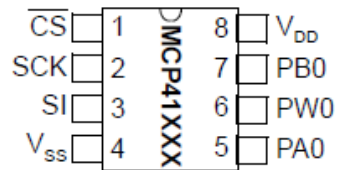
Fonte: Manual do fabricante

Outra peça-chave desse amplificador é o potenciômetro digital utilizado no segundo estágio de amplificação. O circuito integrado (CI) utilizado neste caso foi o MCP41050, que é um potenciômetro digital de 256 posições e 50k Ω de resistência nominal, o que resultou em uma resolução de aproximadamente 195 Ω por incremento e em um acréscimo de 1,95 no ganho do amplificador a cada incremento. É um *chip single channel* e encapsulamento PDIP de 8 pinos. A posição do cursor varia linearmente e é controlada via interface SPI (*Serial Peripheral Interface*).

A disposição dos pinos está apresentada na figura 2-10.

Figura 2-10 Potenciômetro digital MCP41050

PDIP/SOIC



Fonte: Manual do fabricante

Os pinos possuem as funções, descritas no Tabela 2-2.

Tabela 2-2 Funções dos pinos do MCP41050

Número do pino	Nome do pino	Função do pino
1	CS'	Chip Select
2	SCK	Serial Clock
3	SI	Serial Data Input
4	VSS	Ground
5	PA0	Terminal de conexão A do potenciômetro
6	PW0	Conexão do cursor do potenciômetro
7	PB0	Terminal de conexão A do potenciômetro
8	VDD	Alimentação

Fonte: Manual do fabricante

O ganho global dos dois estágios do amplificador é, portanto, variável e pode ser calculado da seguinte maneira:

- $A_1(\text{ganho do primeiro estágio}) = 680000 \left[\frac{V}{A} \right]$, sendo este ganho fixo;
- $A_2(\text{ganho do segundo estágio}) = \frac{U3}{100 \Omega}$, sendo este ganho variável de aproximadamente 0 a 500 com passo de 1,95;
- $A_{Total}(\text{ganho global do amplificador}) = A_1 * A_2 = 680000 * U3 \left[\frac{V}{A} \right]$, sendo este ganho variável de aproximadamente 0 a 340000000 V/A com passo de 1326000 V/A.

Durante a calibração do sistema, os dois sensores devem ser submetidos à mesma intensidade de radiação ultravioleta, emitida pela fonte de luz (não há lentes no caminho ótico entre as fontes de luz e os sensores, neste momento), as saídas dos amplificadores são conectadas ao microcontrolador, que ajusta o ganho através desses potenciômetros digitais, até que os dois valores de tensão coincidam e se igualem a um valor pré-estabelecido.

2.4 Filtro Passa-Baixas

As saídas dos amplificadores fornecem sinais ruidosos. Tais ruídos provêm de fontes externas e internas e podem influenciar as medições realizadas pelo sistema. A fim de amenizar o efeito desses ruídos na precisão das medidas, utilizam-se filtros eletrônicos (ativos) passa-baixas.

Filtro é uma rede que permite a passagem de sinais elétricos dentro de uma faixa de frequências especificada (HUELSMAN, 1993). A tecnologia mais antiga para projeto de filtros usa capacitores e indutores, sendo chamados de filtros passivos (NILSSON e RIEDEL, 2003). Este tipo de filtro funciona adequadamente para aplicações de alta frequência (acima de 100 kHz), porém para baixas frequências, são necessários indutores volumosos, que não têm características ideais, podendo introduzir interferências eletromagnéticas capazes de distorcer a resposta de frequência do sistema. Ademais, não existem técnicas para produzir indutores de forma monolítica (em circuitos integrados), tornando-os incompatíveis com técnicas modernas de projeto e montagem de sistemas eletrônicos (SEDRA e SMITH, 2007). Portanto, é interessante utilizar filtros ativos, compostos apenas por amplificadores operacionais em conjunto com resistores e capacitores.

Os filtros podem ser classificados de acordo com a resposta em frequência, ou seja, a faixa de frequência que permitem passar:

- Filtros passa-baixas (FPB);
- Filtros passa-altas (FPA);

- Filtros passa-faixa (FPF);
- Filtros elimina-faixa (FEF).

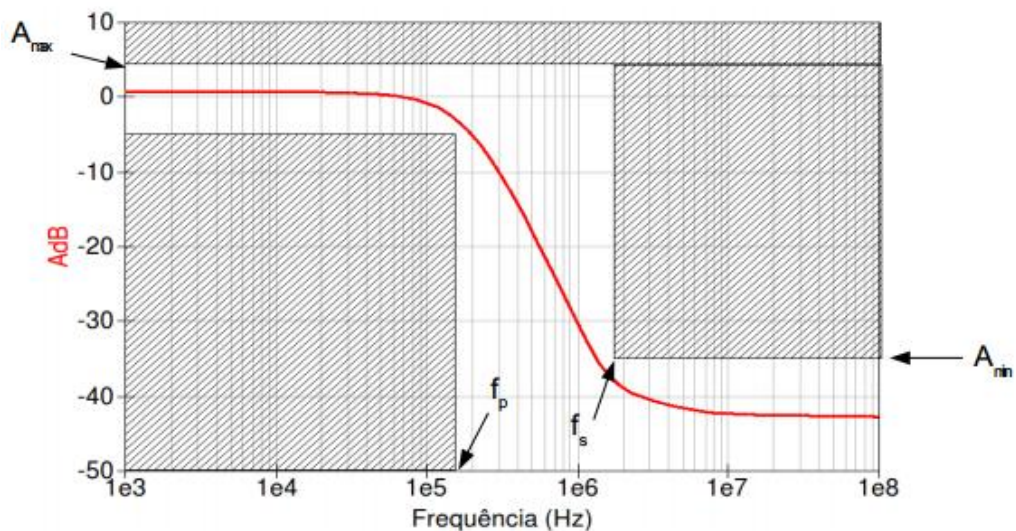
Um filtro passa-baixa permite apenas a passagem de frequências abaixo de um determinado limite, denominada frequência de corte. De acordo com a atenuação, em frequências superiores à frequência de corte, também se pode distinguir entre filtros passa-baixa de primeira-ordem (20 dB por década), de segunda-ordem (40 dB por década), de terceira-ordem (60 dB por década) e assim por diante.

Para resumir, a transmissão de um FPB é especificada por quatro parâmetros:

1. A borda da faixa de passagem, f_p ;
2. A variação máxima permitida na transmissão da faixa de passagem, $A_{máx}$;
3. A borda da faixa de bloqueio, f_s ;
4. A atenuação mínima necessária para a faixa de bloqueio, A_{min} .

Tais parâmetros podem ser visualizados graficamente na figura 2-11.

Figura 2-11 Parâmetros de transmissão de um filtro passa-baixas genérico



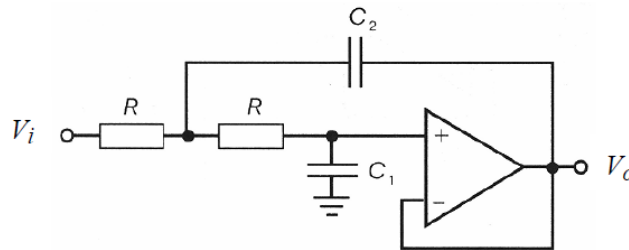
Dentre os vários tipos possíveis, escolheu-se utilizar um filtro ativo, topologia Sallen Key, de Bessel, do tipo passa-baixas, de segunda-ordem.

A topologia Sallen Key é uma topologia simples para implementação de passa-baixas, passa-altas e passa-faixa, tendo a função de transferência facilmente implementada, apresentando ganho unitário ou superior na faixa de passagem.

A razão da escolha do tipo de resposta de Bessel, foi o fato de a faixa de passagem e de rejeição serem planas.

A estrutura básica do filtro está apresentada na figura 2-12.

Figura 2-12 Estrutura básica de um filtro passa baixas de topologia Sallen Key



A função de transferência no domínio da frequência é:

$$H(s) = \frac{(2\pi f_c)^2}{s^2 + 2\pi \frac{f_c}{Q} s + (2\pi f_c)^2}$$

Onde:

- $f_c(\text{frequência de corte}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}};$
- $Q(\text{fator de qualidade}) = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_1(R_1 + R_2)}.$

O fator de qualidade é o que determina o formato de resposta do filtro sendo que para um filtro de Bessel, **Q = 0,5**.

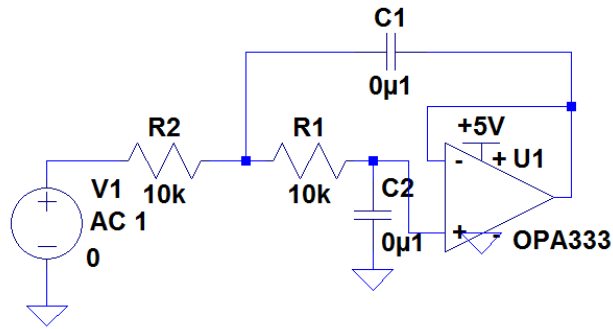
O filtro foi projetado com frequência de corte de aproximadamente 160 Hz, e os componentes utilizados no filtro projetado tem os seguintes valores:

- $R_1 = 10 \text{ k}\Omega;$
- $R_2 = 10 \text{ k}\Omega;$

- $C_1 = 100 \text{ nF}$;
- $C_2 = 100 \text{ nF}$.

O circuito foi montado no *software LTspice*, como pode ser visto na figura 2-13.

Figura 2-13 Circuito simulado no LTspice

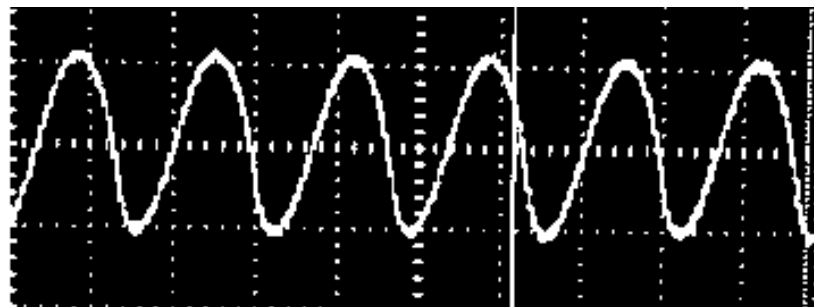


Fonte: Autor

2.5 Sample and Hold

O sinal de saída do filtro passa-baixa é um sinal alternado, com um nível de tensão contínua e frequência 120 Hz, devido à alimentação de tensão das lâmpadas que é feita diretamente da rede, sem retificação. Pode-se visualizar esse sinal na figura 2-14.

Figura 2-14 Sinal de saída do filtro passa-baixas

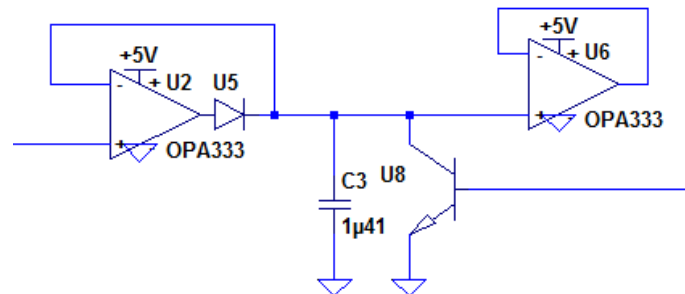


Fonte: Autor

Pelo motivo exposto, acrescentaram-se circuitos *sample and hold* às saídas dos dois sinais, que funcionam como detectores de pico. A função destes circuitos no SOMPUOS é amostrar

o valor de pico do sinal por um período de tempo igual o período do sinal. Os circuitos implementados podem ser vistos na figura 2-15.

Figura 2-15 Circuito do detector de pico



Fonte: Autor

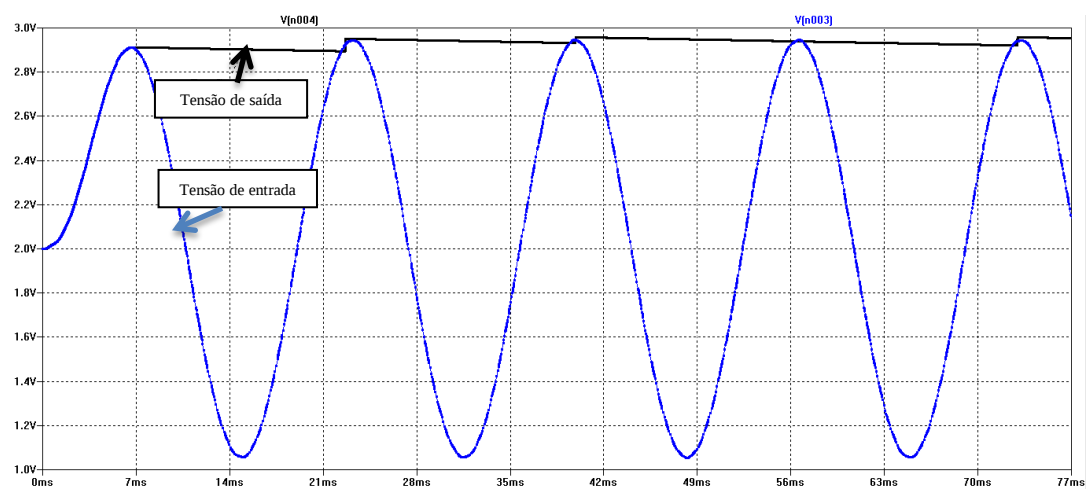
O primeiro estágio do circuito, representado pelo amplificador operacional U2, é um retificador de meia onda de precisão, que retifica o sinal em relação a um nível de tensão contínua armazenada no capacitor. Ele funciona da seguinte maneira: quando a tensão de entrada é maior que a tensão no capacitor C3, a tensão na saída do amplificador operacional (amp. op.) também será maior que a tensão no capacitor C3 e o diodo entra em condução, estabelecendo, portanto, um caminho fechado para a realimentação entre a saída e o terminal de entrada negativo do amp. op.. A realimentação negativa faz aparecer um curto-circuito virtual entre os terminais de entrada do amp. op., fazendo com que a tensão de saída, que é a mesma do terminal negativo, seja igual (com poucos milivolts de diferença) à tensão inicial de entrada positivo. Isto elimina a tensão limiar do diodo, fazendo com que, neste circuito, a tensão de entrada precise exceder apenas um valor desprezivelmente pequeno em relação à tensão armazenada no capacitor, igual à queda de tensão do diodo dividida pelo ganho em malha aberta do amp.op.. Portanto, esse circuito torna-se apropriado para aplicações envolvendo sinais de valores pequenos (SEDRA e SMITH, 2007). O capacitor armazena o pico do sinal no primeiro ciclo e é recarregado cada vez que o pico excede o valor de tensão armazenado por ele.

O segundo estágio do circuito, representado pelo amp. op. U6, é um *buffer* que mantém uma impedância de saída elevada para que se obtenha um longo período de armazenamento do valor de pico.

O transistor U8 funciona como uma chave que é acionada pelo microcontrolador quando é preciso dar um curto circuito no capacitor, para que a tensão armazenada seja zerada e se torne possível armazenar um novo valor. Na prática, o transistor não zera completamente a tensão armazenada no capacitor, devido à queda de tensão que existe entre seu coletor e emissor. Não foram feitos testes para verificar qual a tensão residual presente no capacitor, no entanto, esse circuito funciona satisfatoriamente para essa aplicação.

Pode-se visualizar na figura 2-16, a forma de onda de entrada e de saída desse circuito.

Figura 2-16 Formas de onda de entrada e de saída do circuito detector de pico

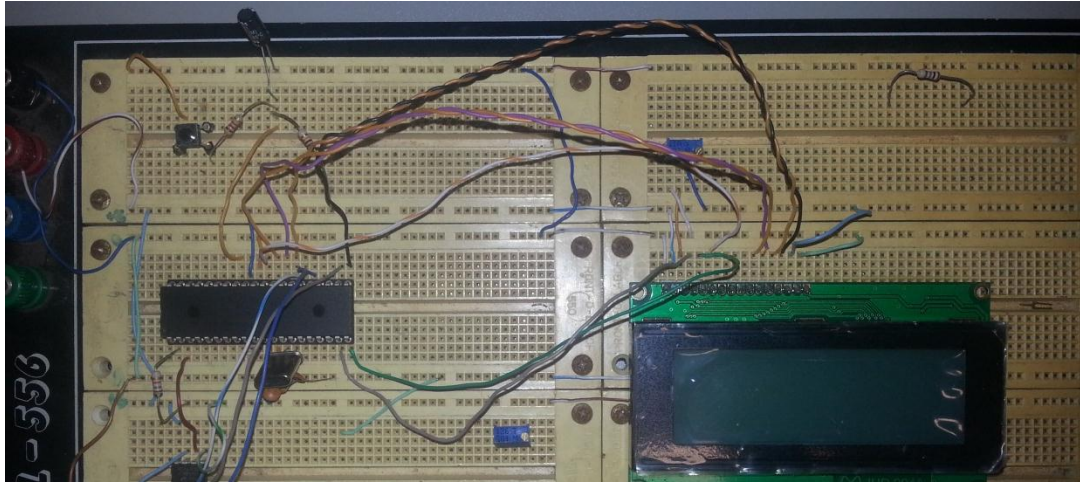


Fonte: Autor

2.6 Microcontrolador PIC18F4550

O sistema é controlado por um microcontrolador PIC18F4550 da fabricante Microchip. Além de controlar o sistema, ele realiza os cálculos de transmitância e envia os resultados para um display de LCD, como apresenta-se na figura 2-17 abaixo.

Figura 2-17 Microcontrolador e LCD



Fonte: Autor

O PIC18F4550 é adequado ao SOMPUOS pois possui as seguintes características:

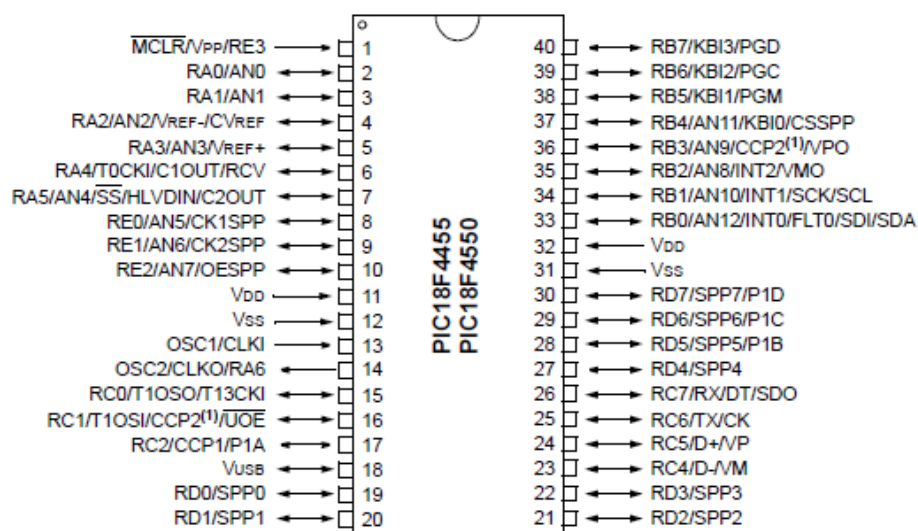
- Possui conversor analógico/digital de 10 *bits* integrado, podendo apresentar os resultados dos testes com uma resolução de aproximadamente 0,1%;
- Possui interface serial SPI, necessária para controle do ganho dos amplificadores, através dos potenciômetros digitais;
- Possui frequência de *clock* adequada ao projeto e para a comunicação com o *display*;
- Possui uma memória RAM interna, essencial no processo de cálculo da transmitância das lentes;
- Possui tensão de alimentação compatível com os demais componentes do projeto;
- Tem níveis de tensão compatíveis com os demais elementos com os quais deve se comunicar (*display* LCD e conversor analógico digital).

Através do *software* MPLab, foi possível escrever um programa que realiza todas as rotinas necessárias para os testes. Este programa é escrito em linguagem C, traduzido para linguagem de máquina, *Assembly*, pelo MPLab e armazenado na memória de programa, Flash, de 32 Kbytes, que são suficientes para a programação desejada.

O dispositivo utilizado neste projeto está apresentado na figura 2-18. Ele possui encapsulamento PDIP (*plastic dual in-line package*) de 40 pinos, que facilita a montagem das placas eletrônicas.

Figura 2-18 Diagrama dos pinos do PIC18F4550

40-Pin PDIP



Fonte: Manual do fabricante

A seguir descreve-se o modo como foram conectados os pinos do microcontrolador e suas respectivas funções.

A alimentação utilizada no SOMPUOS foi de 5V e, no microcontrolador, a alimentação é realizada através dos pinos VDD (+5V) e VSS (terra). Para garantir a permanência da tensão de alimentação em valores estáveis e pertencentes à faixa recomendada pelo fabricante (tensão de alimentação entre 4,2V e 5,5V), foi utilizado um controlador de tensão.

Cada porta (A,B,C D e E) tem um registrador TRIS que é ajustado de acordo com a configuração desejada para cada porta.

As portas RA0 e RA1, pinos 2 e 3, respectivamente, são utilizadas como portas de entrada. Elas têm conversores A/D de 10 bits integrados e estão conectadas às saídas dos circuitos detectores de pico, sendo responsáveis pela leitura dos sinais provenientes dos fotodiodos(sensores). Essas portas deverão realizar a leitura de sinais analógicos, que são

convertidos para digitais, pelos conversores A/D. Já na forma digital, os sinais podem ser interpretados pelo microcontrolador.

A conexão com o LCD é descrita na tabela 2-3.

Tabela 2-3 Conexão do display LCD JHD204A com o PIC 18F4550

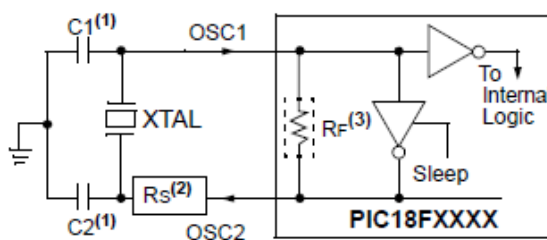
Pino do PIC18F4550	Pino do LCD	Função do pino
4	RS	Seleção entre dado(1) ou instrução(0)
5	R/W	Seleção entre leitura(1) ou escrita(0)
6	E	Seleção entre habilitado (1) ou desabilitado(0)
7	DB0	Barramento de Dados(LSB)
8	DB1	Barramento de Dados
9	DB2	Barramento de Dados
10	DB3	Barramento de Dados
11	DB4	Barramento de Dados

Fonte: Autor

O pino MCLR'(pino 1) tem a função de reiniciar o PIC a qualquer momento. Ele é conectado à tensão de 5V através de um resistor, pois não será utilizado, já que o *reset* do microcontrolador é realizado via *software*.

Os pinos OSC1 e OSC2 (pinos 13 e 14) são utilizados para gerar o *clock* do microcontrolador. Os dispositivos PIC18F2455/2550/4455/4550 podem ser operados em doze modos distintos de oscilador, que não convém serem descritos individualmente. Optou-se por utilizar o modo XT, onde um cristal oscilador é conectado ao microcontrolador segundo a configuração de pinos mostrada na figura 2-19.

Figura 2-19 Conexão dos pinos para gerar o *clock* do microcontrolador

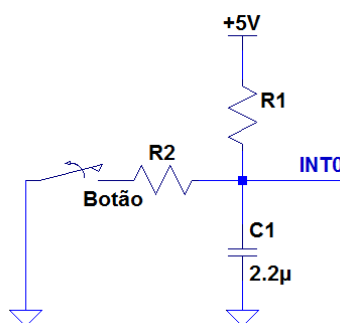


Fonte: Manual do fabricante

O cristal utilizado tem frequência de oscilação de 12MHz. Este está conectado à referência (terra) através de dois capacitores de 33 μ F (C_1 e C_2). Essa opção foi a escolhida por dispensar o uso de circuitos osciladores. No entanto, no modo XT, a frequência de oscilação adequada é de 4MHz e para que não haja incompatibilidade do cristal utilizado, divide-se sua frequência de oscilação por 3, através da configuração de um registrador denominado PLL Prescaler.

O programa embarcado no SOMPUOS necessita de uma interrupção externa, que é acionada por um botão operado pelo usuário. Para gerar essa fonte de interrupção externa (INT 0), foi implementado o circuito apresentado na figura 2-20, denominado *debounce* e a interrupção foi configurada para ser sensível à borda de descida, já que a chave desenvolvida mantém nível de saída alto quando não acionada.

Figura 2-20 Circuito *debounce*



Fonte: Autor

Deve-se atentar à condição de que R_1 deve ter valor maior que R_2 para o correto funcionamento do circuito e, portanto, R_1 vale 10k Ω e R_2 vale 1,2k Ω . No instante em que o circuito é energizado, o capacitor C_1 é carregado, tornando-se um circuito aberto após um curto intervalo de tempo, impedindo a passagem de corrente e fixando INT0 em nível alto (5V). Quando o botão é pressionado, leva-se o pino INT0 a nível baixo, pois $R_1 \gg R_2$, acionando desta forma a interrupção.

2.7 Programa Controlador

Para que o microcontrolador possa controlar a comunicação entre os dispositivos que integram o SOMPUOS, realizar os cálculos e exibir os resultados através de um *display* LCD, foi desenvolvido um programa, cujo fluxograma é apresentado na figura 2-21.

A memória RAM interna é inteiramente apagada na inicialização do programa, a fim de evitar erros provenientes de valores previamente armazenados, caso os endereços de memória, onde estão esses valores, sejam utilizados pelo algoritmo.

No cabeçalho da programação são colocadas todas as configurações do microcontrolador, para que este opere da forma desejada. Os portas são então configuradas de acordo com seu uso (como portas de entrada ou saída) e o *display* é iniciado com os comandos que determinam o seu modo de operação.

Após a inicialização, é enviada a primeira tela ao *display*, com a instrução para o usuário do sistema. Em seguida, ocorre um atraso de 60 segundos no programa, a fim de aguardar o aquecimento das lâmpadas. A segunda mensagem é enviada ao visor e, em seguida, é executada a rotina de calibração do sistema. Durante esta rotina, o sinal proveniente do sensor de medição é igualado, em módulo, ao sinal proveniente do sensor de referência, através do ajuste do ganho dos amplificadores por meio dos potenciômetros digitais que, por sua vez, são controlados pelo microcontrolador.

A próxima instrução solicita ao usuário que posicione seus óculos no SOMPUOS e aguarda o acionamento do botão. Enquanto o botão não for pressionado, o sistema fica em um *loop* infinito, aguardando que a interrupção externa - ativada pelo botão – ocorra e torne falsa a condição do *loop* “*while*”.

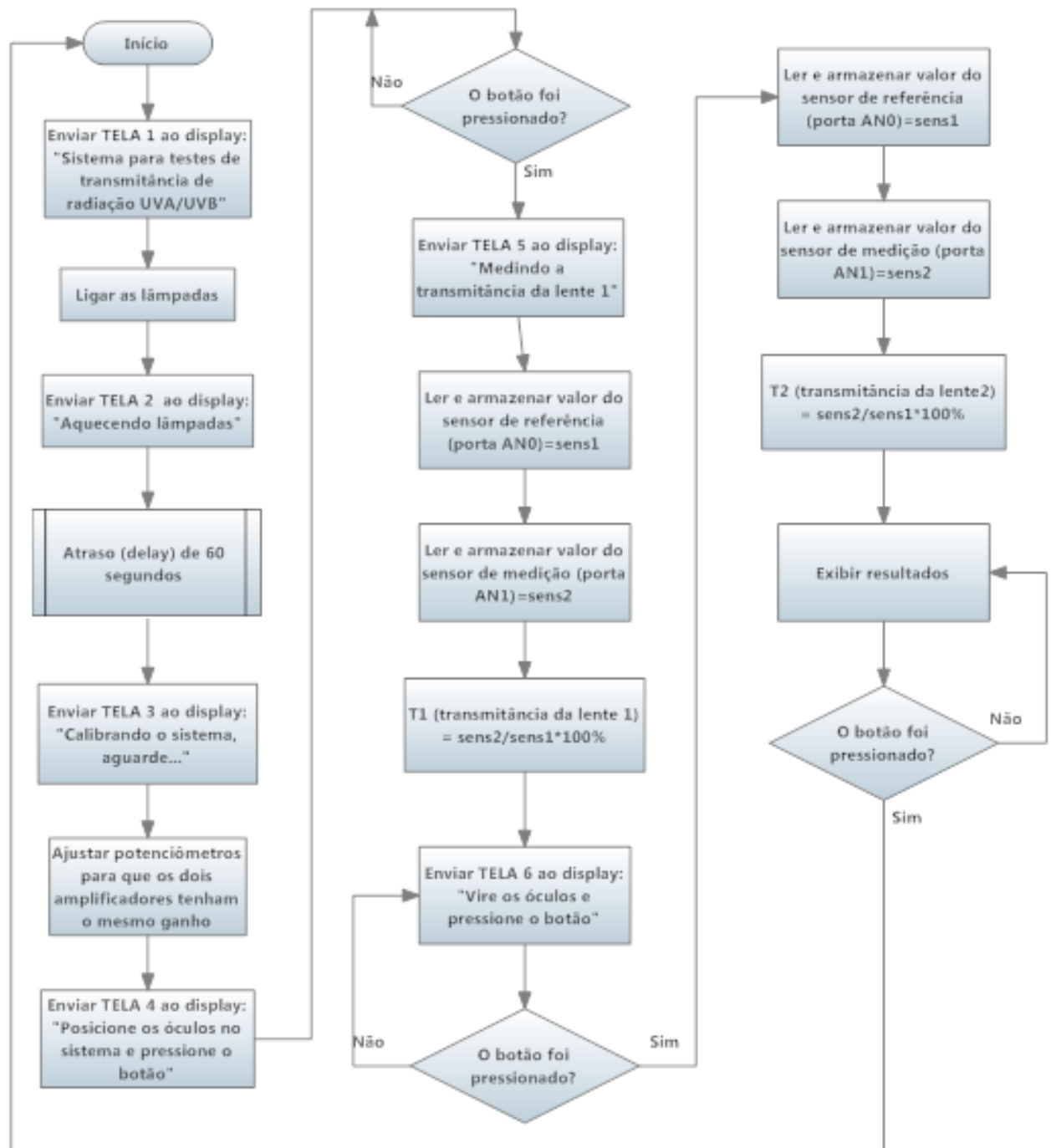
A medição da lente 1 é então realizada, dividindo-se o sinal do sensor de medição pelo sinal do sensor de referência, tomando-se a média de 60 amostras e armazenando esse resultado na memória RAM.

Em seguida, o sistema pede ao usuário que vire o óculos, para que seja medida a transmitância da outra lente e, da mesma forma que anteriormente, fica em um *loop* infinito até que o usuário pressione o botão novamente.

A medição da lente 2 é então realizada da mesma forma.

Os resultados das duas lentes são enviados ao *display*, disponibilizando a informação ao usuário. Mais uma vez, o sistema fica em um loop infinito, aguardando que o acionamento do botão para reiniciar e realizar novas medições.

Figura 2-21 Fluxograma do programa embarcado



Fonte: Autor

2.8 O *Display* LCD

Para realizar a interface entre o usuário e o microcontrolador, foi utilizado um *display* LCD (*Liquid Crystal Display*) modelo JHD204A, que possui quatro linhas com 20 caracteres cada, escolhido por ter uma interface de comunicação simples e níveis de tensão compatíveis com os do sistema.

As funções de cada um dos pinos do *display* LCD estão apresentadas na tabela 2-4.

Tabela 2-4 Funções dos pinos do *display* JHD 204A

Número do pino	Nome do pino	Função do pino
1	VSS	Terra
2	VDD	Alimentação
3	VEE	Regula o contraste do visor
4	RS	Seleção entre dado(1) ou instrução(0)
5	R/W	Seleção entre leitura(1) ou escrita(0)
6	E	Seleção entre habilitado (1) ou desabilitado(0)
7	DB0	Barramento de Dados(LSB)
8	DB1	Barramento de Dados
9	DB2	Barramento de Dados
10	DB3	Barramento de Dados
11	DB4	Barramento de Dados
12	DB5	Barramento de Dados
13	DB6	Barramento de Dados
14	DB7	Barramento de Dados(MSB)
15	LED+	Anodo <i>backlight</i>
16	LED-	Catodo <i>backlight</i>

Fonte: Manual do fabricante

A conexão entre o LCD e o microcontrolador já foi descrita anteriormente.

O contraste dos caracteres apresentados pelo *display* LCD pode ser ajustado através do pino 3 do dispositivo, através de um *trimpot* operando como divisor de tensão.

Com a exceção do contraste, que é controlado manualmente pelo usuário, o microcontrolador controla todos os outros *bits* do LCD, sem que haja interação do usuário ou mesmo do programador diretamente, pois a programação foi feita em linguagem C e apenas utiliza funções pré-definidas para comunicação com o *display*.

O pino E controla a habilitação/deshabilitação do visor. Nível lógico alto habilita o *display*, enquanto nível lógico baixo desliga-o.

O pino RS determina se a informação a ser enviada ao *display* é um código ASCII de um caractere ou uma instrução. Se o nível lógico for alto, o *byte* presente do barramento de dados será convertido pelo *display* no caractere correspondente da tabela ASCII e será impresso. Se estiver em nível lógico baixo, o *byte* no barramento de dados será interpretado como uma instrução.

O *display* LCD tem capacidade de receber e enviar dados durante a operação para dispositivo que o controla. É o nível lógico do pino R/W que determina em que modo o *display* vai operar. No SOMPUOS, o microcontrolador envia dados ao *display* na maior parte do tempo, recebendo dados apenas para verificar se esse já concluiu o processamento de uma instrução e está disponível para executar novas tarefas.

Para reduzir o número de comandos do programa, utilizou-se a biblioteca *lcdplus.h*, que define funções utilizadas para controlar o *display*. Essas funções são:

- **lcd_init():** inicializa o LCD;
- **lcd_gotoxy(0,0):** leva o cursor para a primeira coluna da primeira linha do LCD;
- **lcd_putc:** envia caracteres para o LCD;
- **/f:** limpa a tela do LCD;
- **/n:** inicia uma nova linha.

3 Resultados

Os testes do sistema foram divididos em 6 partes: o teste da interface com o usuário, o teste da ótica do sistema, da amplificação da transimpedância, dos filtros, do *sample and hold* e as medidas das lentes no sistema.

3.1 Testes de Interface

Foram realizados testes para verificar o funcionamento do programa desenvolvido juntamente com o *display LCD* e o botão que controla o sistema. Como essa é a única interface entre o sistema e o usuário é imprescindível que o *display* apresente sempre as mensagens completas e com todos os caracteres perfeitamente legíveis.

Foram testadas as condições físicas do *display*, a interface entre o *display* e o microcontrolador e o funcionamento de todas as telas do programa. Para isto, o programa desenvolvido foi inserido no microcontrolador e executado.

Nas figuras 3-1 a 3-7 pode-se visualizar as telas resultantes em cada etapa do teste.

Figura 3-1 Tela 1 do sistema

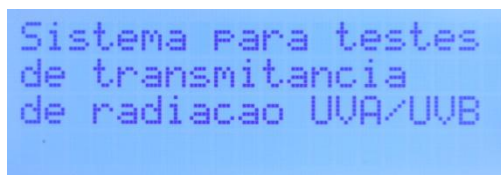
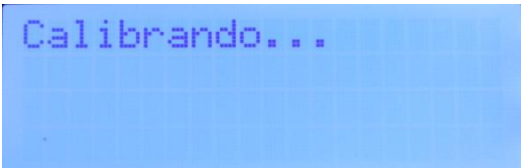
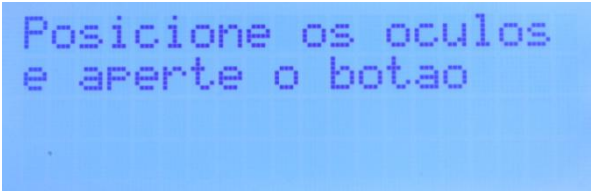


Figura 3-2 Tela 2 do sistema



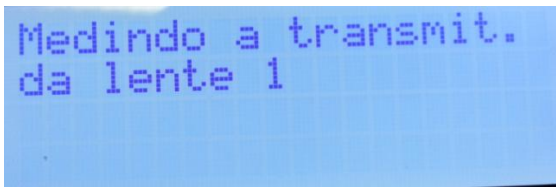
Calibrando...

Figura 3-3 Tela 3 do sistema



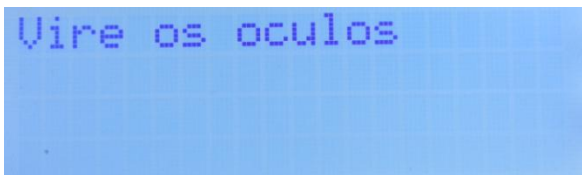
Posicione os oculos
e aperte o botao

Figura 3-4 Tela 4 do sistema



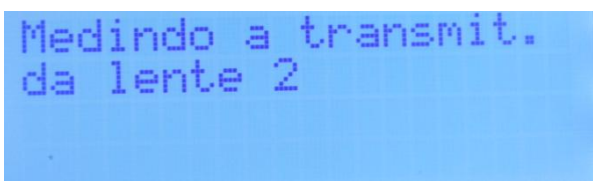
Medindo a transmit.
da lente 1

Figura 3-5 Tela 5 do sistema



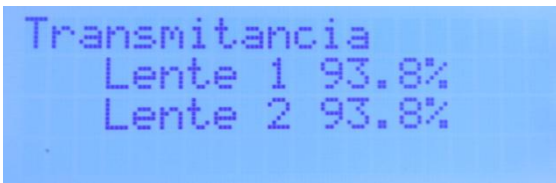
Vire os oculos

Figura 3-6 Tela 6 do sistema



Medindo a transmit.
da lente 2

Figura 3-7 Tela 7 do sistema



Transmitancia
Lente 1 93.8%
Lente 2 93.8%

Após a última tela, ao acionar-se mais uma vez o botão, o SOMPUOS pode ser testar outros óculos.

3.2 Ótica do Sistema

Como mencionado, com a finalidade de obter um espectro que esteja em concordância com a norma brasileira, foram utilizadas, no SOMPUOS, duas lâmpadas emissoras de radiação UVA e UVB montadas em um gabinete de *nylon* preto, construído para manter o seu alinhamento. As lâmpadas são de fabricação da Philips.

Utilizando o espectrofotômetro *Ocean Optics USB 2000®*, disponível no LIO, obtiveram-se os espectros de cada lâmpada e da associação das duas lâmpadas. Os resultados podem ser visualizados nas figuras 3-8, 3-9 e 3-10 respectivamente.

Figura 3-8 Espectro emitido pela lâmpada emissora de UVA

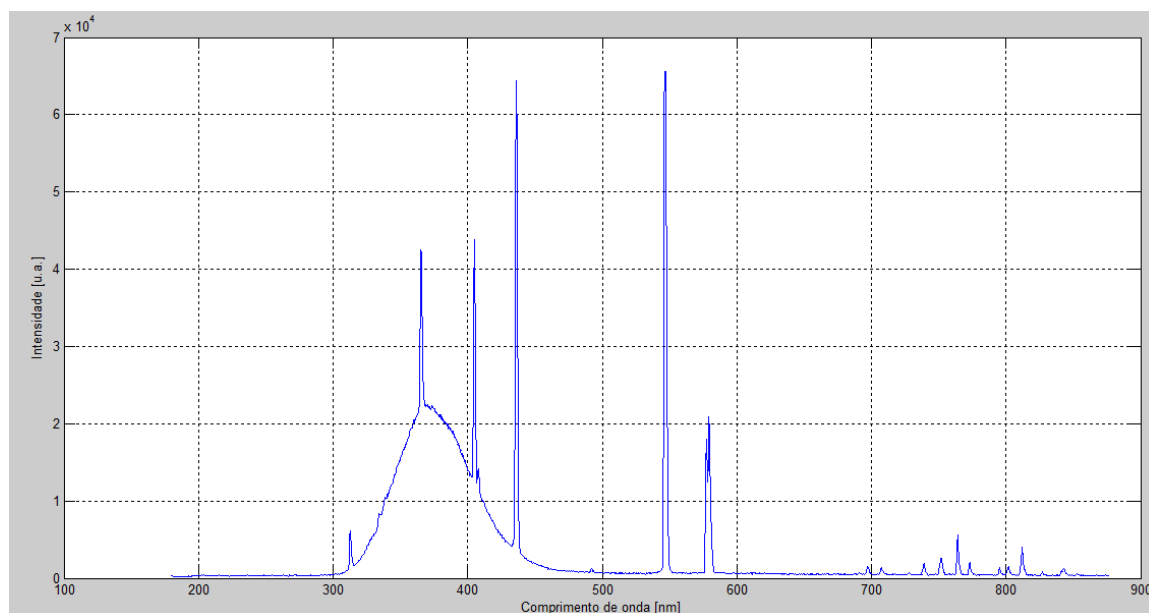


Figura 3-9 Espectro emitido pela lâmpada emissora de UVB

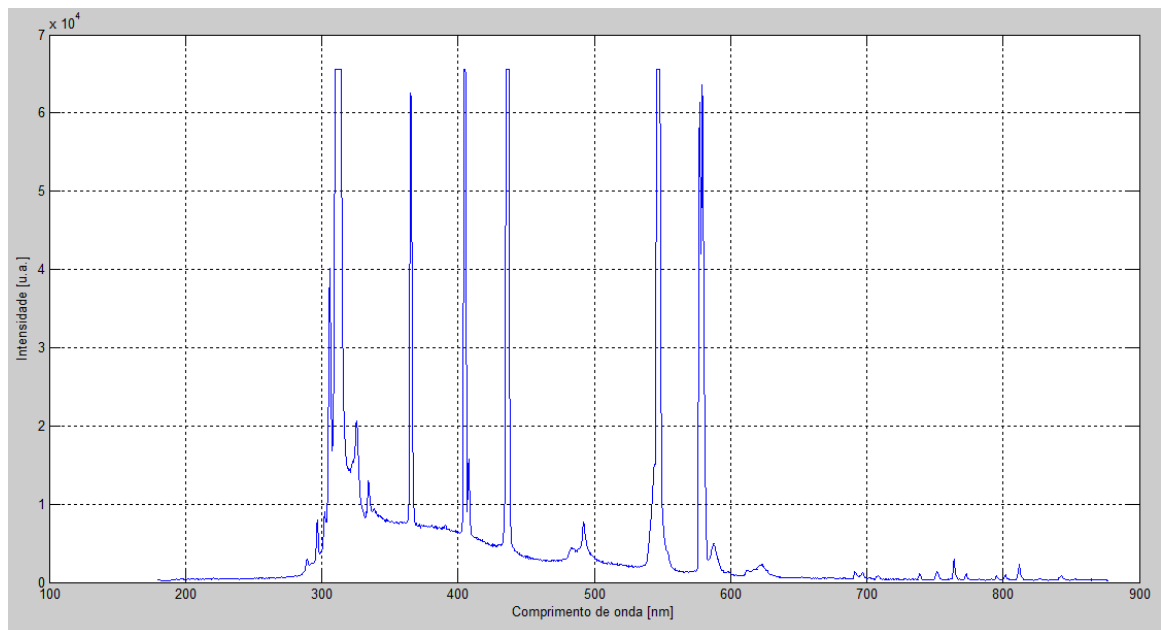
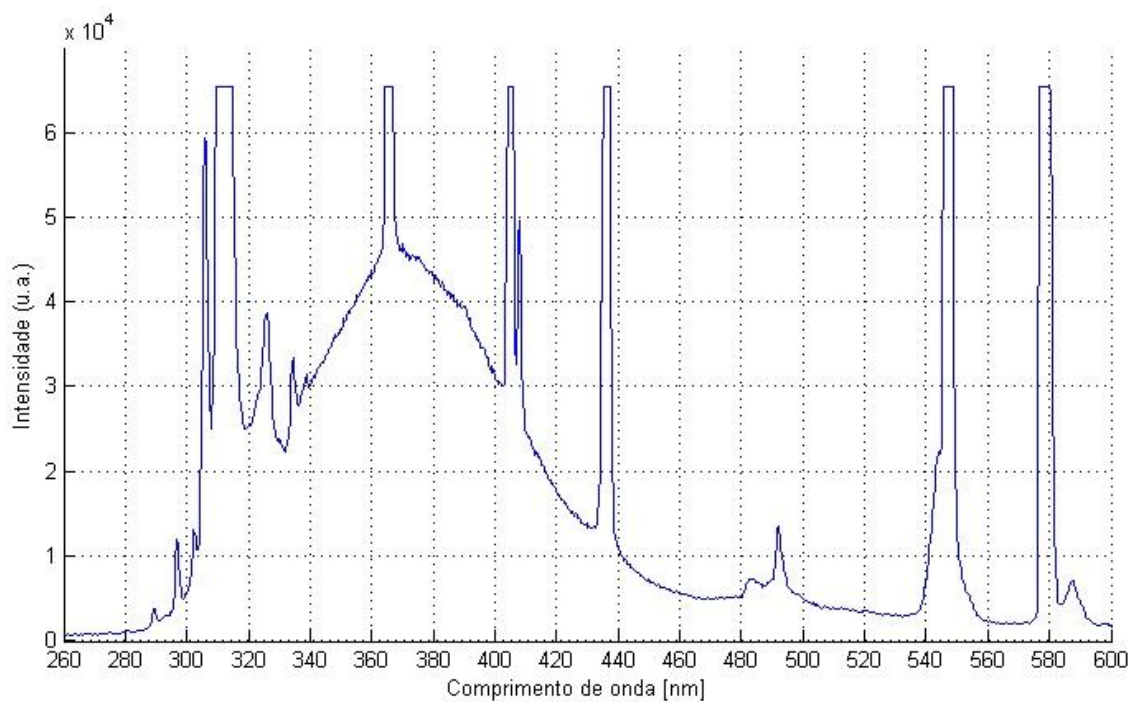


Figura 3-10 Espectro emitido pela associação das lâmpadas

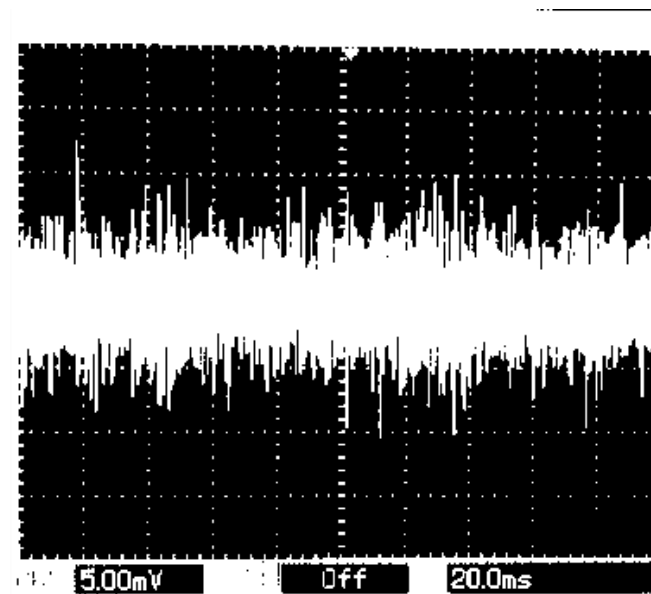


A associação das lâmpadas abrange a faixa de comprimento de onda no intervalo requerido pela norma NB5 15.111 (ABNT, 2004) que vai de 280nm à 380nm.

3.3 *Offset* e Análise em Frequência dos Amplificadores de Transimpedância

Foram realizados testes a fim de estabelecer o nível de ruído e *offset* dos amplificadores utilizados.

Figura 3-11 Saída do amplificador de transimpedância com a entrada em aberto

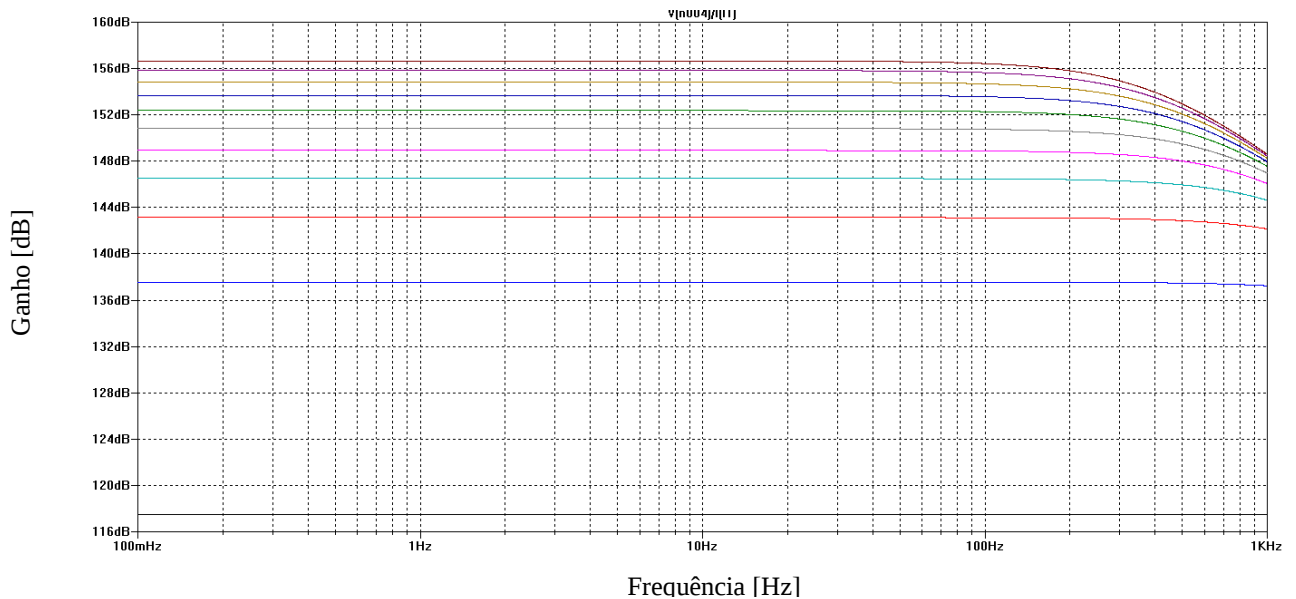


Pode-se observar, na figura 3-11, que o valor médio do *offset* vale 0 mV. Isto se deve ao fato de que o amplificador do SOMPUOS utiliza uma técnica de autocalibração que fornece uma tensão de offset muito baixa ($10\mu\text{Vpp}$ max).

A saída apresenta um ruído de amplitude 22,57 mV. Tal ruído é tratado num próximo estágio do SOMPUOS, pelos filtros passa-baixas.

Foi feita ainda, uma análise da resposta em frequência dos amplificadores através de simulação no *software* Ltspice, para garantir que operem bem na faixa de frequência desejada (até 100 Hz, aproximadamente). Nesta análise, variou-se o valor do potenciômetro de 1 a 50 k Ω , com 10 passos. Na figura 3-12 apresenta-se o resultado desta análise.

Figura 3-12 Análise em frequência dos amplificadores, variando-se o valor do potenciômetro digital



3.4 Offset e Análise em Frequência dos Filtros Passa-Baixas

Foram realizados testes a fim de estabelecer o nível de ruído e *offset* dos filtros utilizados.

Através da figura 3-13, observa-se que o valor médio do *offset* vale 28 mV, com uma amplitude de 24,55mV e frequência 60Hz. A possível causa para esse *offset* é interferência da rede elétrica, já que se trata de um sistema com alta amplificação e muito sensível ao ruído.

A análise em frequência dos filtros projetados pode ser visualizada na figura 3-14 e resultou em uma frequência de corte de aproximadamente 160 Hz.

Figura 3-13 Offset e ruído dos filtros utilizados

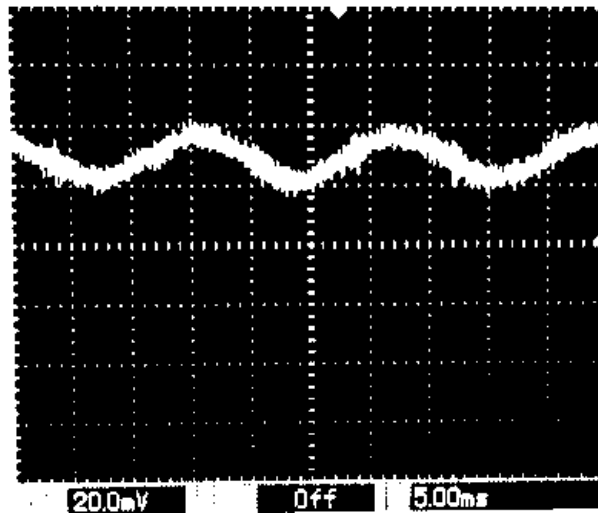
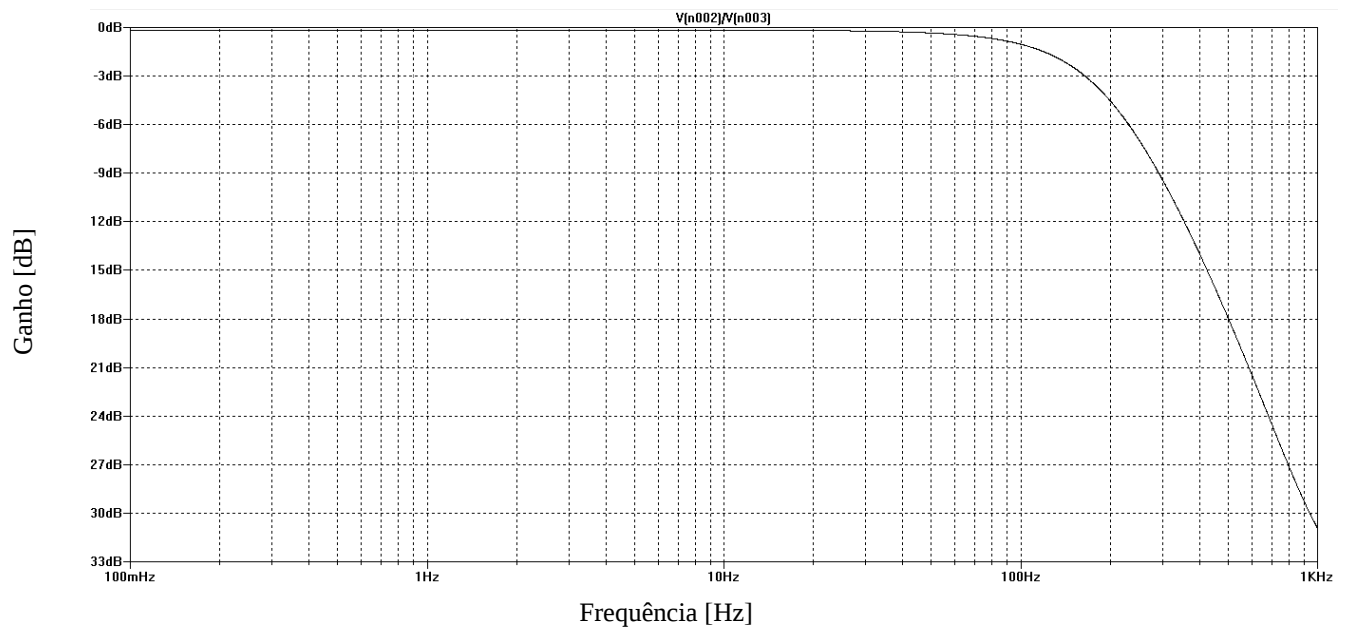


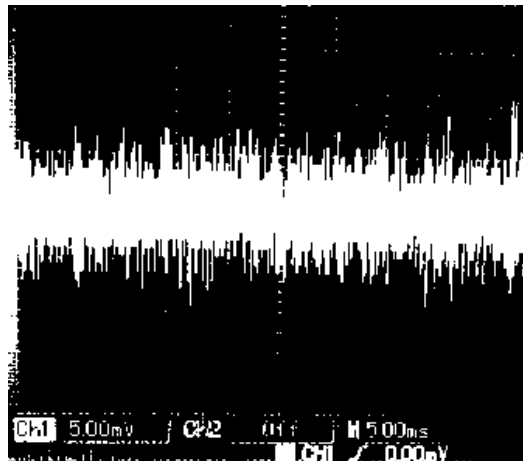
Figura 3-14 Resposta em frequência do filtro, simulada no Ltspice



3.5 Offset e Fator de Ripple do Circuito *Sample and Hold*

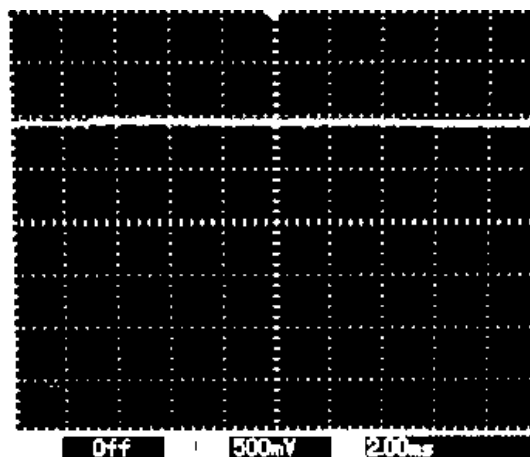
Para verificar a eficácia do *Sample and Hold* empregado, foram analisados os valores de *offset* e ondulação em sua saída, que são apresentados nas figura 3-15 e 3-16.

Figura 3-15 *Offset* e ruído do *sample and hold* utilizado



O valor médio do *offset* vale $-400 \mu\text{V}$, com uma amplitude de $19,80 \text{ mV}$ e frequência 60Hz .

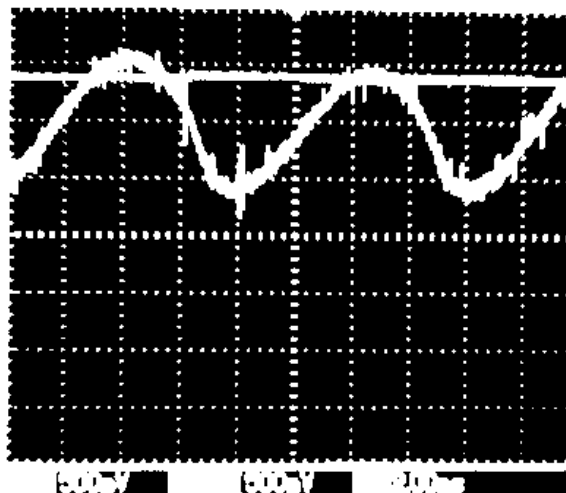
Figura 3-16 Fator de ondulação *sample and hold* utilizado



O *ripple* do *Sample and Hold* tem amplitude $79,80\text{mV}$.

Na figura 3-17 pode-se visualizar o sinal de entrada do detector de pico em azul e o sinal de saída em amarelo. Esta figura serve apenas para ilustrar o funcionamento desse circuito.

Figura 3-17 Sinal de entrada do detector de pico (azul) e o sinal de saída (amarelo)



3.6 *Offset* Total Do Sistema

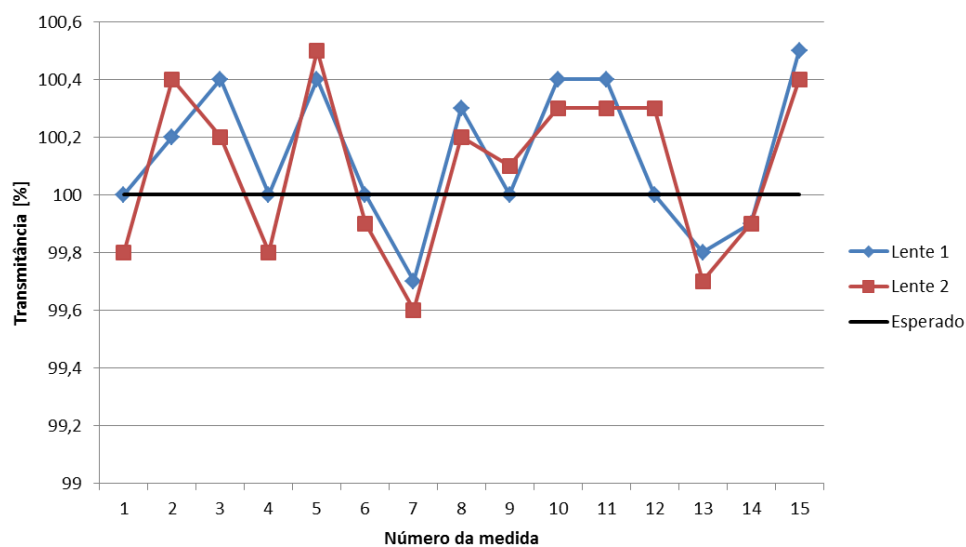
Mediu-se o valor do *offset* total do SOMPUOS. O valor obtido pelo osciloscópio foi de aproximadamente 8 mV e o valor exibido no display foi 0,2%.

3.7 Testes de Calibração

Foi testada a calibração do sistema sem lentes no caminho ótico entre as fontes de luz e os sensores. Nessa situação a transmitância deveria ter valor de 100%. Na tabela 3-1.

Tabela 3-1 Teste de repetibilidade da calibração

Lente 1	Lente 2
100,0	99,8
100,2	100,4
100,4	100,2
100	99,8
100,4	100,5
100,0	99,9
99,7	99,6
100,3	100,2
100,0	100,1
100,4	100,3
100,4	100,3
100,0	100,3
99,8	99,7
99,9	99,9
100,5	100,4



Obteve-se, para essas medidas:

- Média (Lente 1) = 100,1333% ;
- Desvio Padrão (Lente 1) = 0,2767% ;
- Média (Lente 2) = 100,0933% ;
- Desvio Padrão (Lente 2) = 0,2726% .

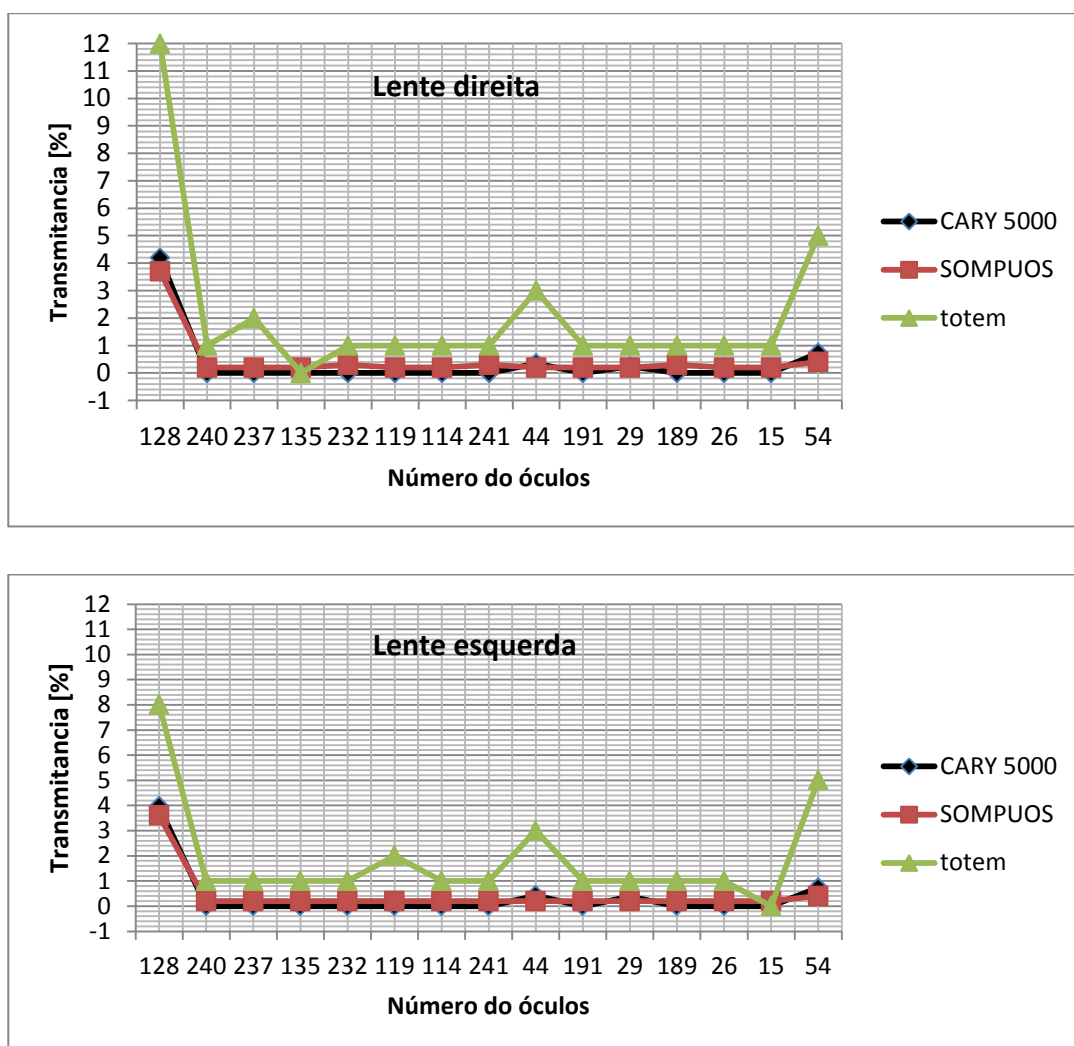
3.8 Testes em Lentes Oftálmicas

Foram realizados testes em lentes de óculos de sol disponíveis no LIO, utilizando o SOMPUOS e o totem auto-atendimento do LIO. Os valores obtidos foram comparados com testes realizados utilizando o CARY 5000 e são apresentados na tabela 3-2 e na figura 3-18.

Tabela 3-2 Transmmitância UVA e UVB de lentes dos óculos de sol testados

Óculos	L. Direita [%] (CARY 5000)	L. Direita [%] (SOMPUOS)	L. Direita [%] (totem)	L. Esquerda [%] (CARY 5000)	L. Esquerda [%] (SOMPUOS)	L. Esquerda [%] (totem)
128	4,1977	3,7	12	3,96	3,6	8
240	0,0001	0,2	1	0,0001	0,2	1
237	0,0001	0,2	2	0,0002	0,2	1
135	0,0031	0,2	0	0,0031	0,2	1
232	0,0001	0,3	1	0	0,2	1
119	0,0005	0,2	1	0,0012	0,2	2
114	0,0002	0,2	1	0,0003	0,2	1
241	0,0000	0,3	1	0,0001	0,2	1
44	0,3421	0,2	3	0,4239	0,2	3
191	0,0002	0,2	1	0,0002	0,2	1
29	0,2357	0,2	1	0,3746	0,2	1
189	0,0003	0,3	1	0,0004	0,2	1
26	0,0003	0,2	1	0	0,2	1
15	0,0000	0,2	1	0	0,2	0
54	0,7316	0,4	5	0,7361	0,4	5

Figura 3-18 Resultados dos testes em lentes oftálmicas|



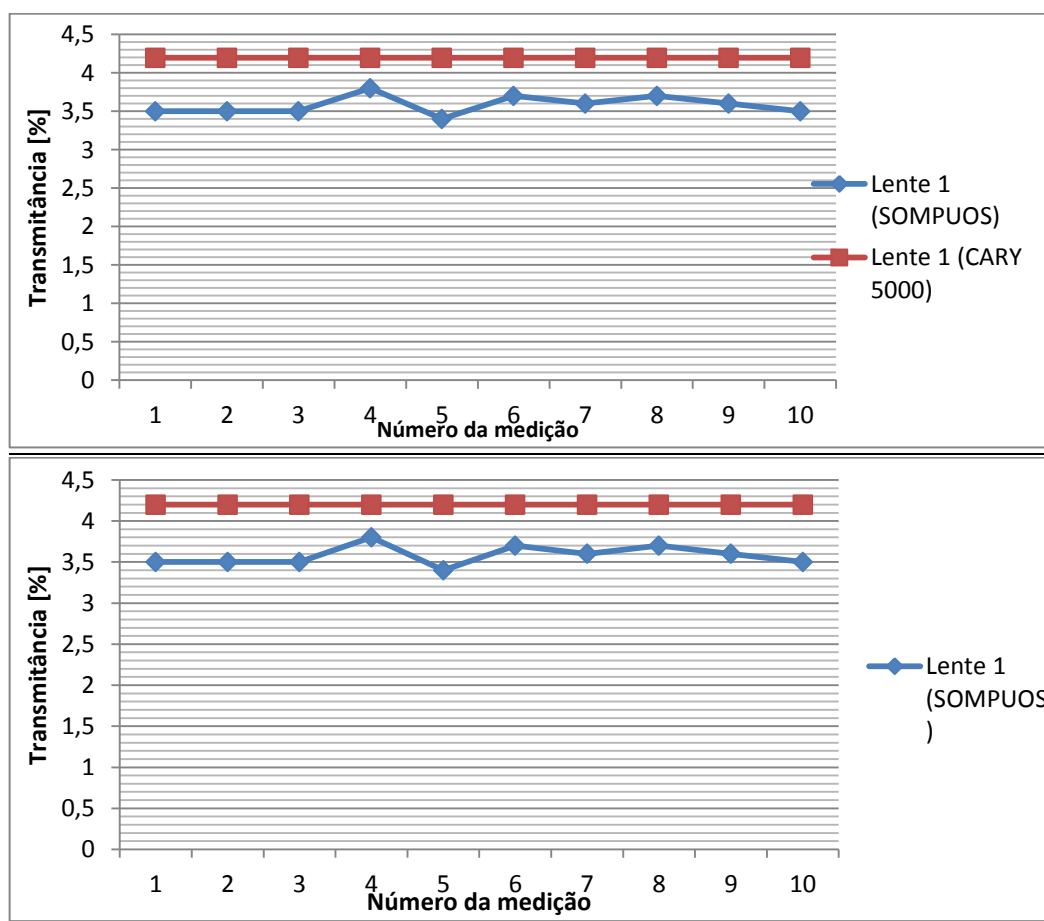
O índice de correlação entre as medidas obtidas pelo SOMPUOS e as medidas obtidas pelo CARY 5000 da fabricante Varian foi de $r^2 = 0,9852$. Enquanto isso, o índice de correlação entre as medidas obtidas pelo totem e as medidas obtidas pelo CARY 5000 da fabricante Varian foi de $r^2 = 0,9332$.

Foram realizados também testes para verificar a repetibilidade das medidas. Os resultados são apresentados na tabela 3-3 e na figura 3-19.

Tabela 3-3 Testes de repetibilidade

Lente 1 [%]	Lente 2 [%]
3,5	3,4
3,5	3,5
3,5	3,3
3,8	3,5
3,4	3,5
3,7	3,4
3,6	3,4
3,7	3,6
3,6	3,4
3,5	3,5

Figura 3-19 Resultados dos testes de repetibilidade da medida de transmitância



As transmitâncias das lentes 1 e 2 medidas no CARY 5000 foram, 4,19% e 3,96%, respectivamente.

Filtros com variadas transmitâncias no UVA e UVB serão confeccionados para serem o padrão ouro para calibração do sistema.

4 Discussão

4.1 Resolução do Sistema Desenvolvido

Um parâmetro importante para a realização de uma medida adequada da transmitância de uma lente é a resolução com a qual o sistema apresenta os resultados. No SOMPUOS, assim como em qualquer aplicação que envolve conversões de analógico para digital, a resolução é limitada pelo número de bits da saída digital do conversor A/D.

O valor da transmitância da lente exibido ao usuário através do *display* é uma função da saída digital do conversor. *bits* O conversor A/D utilizado é o do próprio PIC18F4550, que possui 10 bits.

Calcula-se o valor mostrado no *display* em relação ao valor analógico de entrada através da equação 5.

$$Saída_{display} = \frac{Sinal\ lente}{Sinal\ referência} \times 1023 \quad (5)$$

$$\text{com, } 0 < \frac{Sinal\ lente}{Sinal\ referência} < 100\%$$

Como o valor mostrado no *display* varia de 0 a 100% em 1024 níveis, já que o conversor possui 10 *bits*, a resolução da medida é:

$$Resolução = \frac{100\%}{1024\ níveis} = \frac{0,0976\%}{nível}$$

Assim, a resolução do sistema é de 0,0976%. No entanto, o programa foi desenvolvido para mostrar apenas uma casa decimal, aproximando o valor da resolução do sistema para 0,1%.

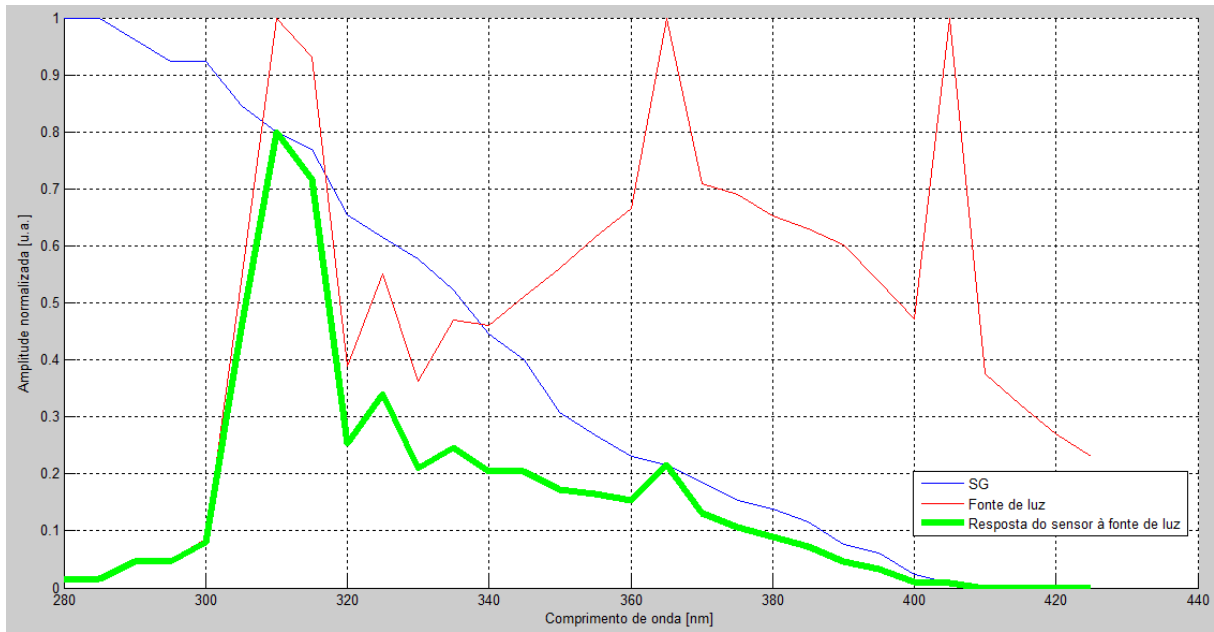
O valor de resolução obtido está dentro dos limites necessários, pois a norma requer medidas com precisão de 0,5%.

Existe ainda um erro de quantização, que é inerente ao processo de conversão A/D. Este erro introduz uma incerteza de um bit a mais ou a menos no LSB (Least Significant Bit), sendo assim, acrescenta um erro de $\pm 0,1\%$.

4.2 Análise da Qualidade do Espectro Obtido

Os espectros de cada lâmpada e da fonte de luz UV (associação das duas lâmpadas) foram expostos na seção anterior, nas figuras 3-8, 3-9 e 3-10. Buscou-se através da associação das lâmpadas Philips e do sensor SGLUX, obter uma resposta espectral próxima a da curva estabelecida pela norma de $E_{S\lambda}(\lambda) \times S(\lambda)$.

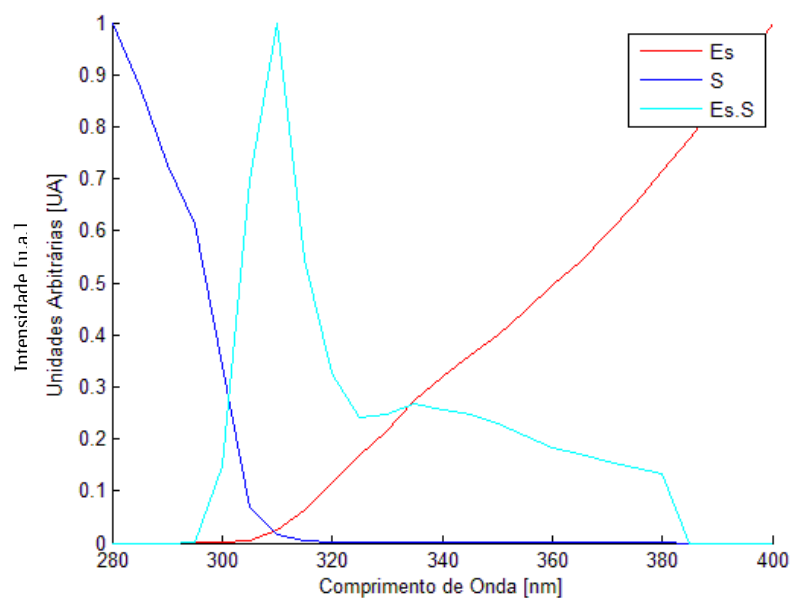
Figura 4-1 Resposta do sensor à fonte de luz incorporada ao sistema



Fonte: Autor

A figura 4-1 mostra que o espectro, em vermelho, obtido pela combinação das lâmpadas tem formato diferente do da radiação solar $E_{S\lambda}(\lambda)$; figura 4-2, e que a resposta do sensor tem o formato parecido com o da curva de ação eritêmica $S(\lambda)$, figura 4-2.

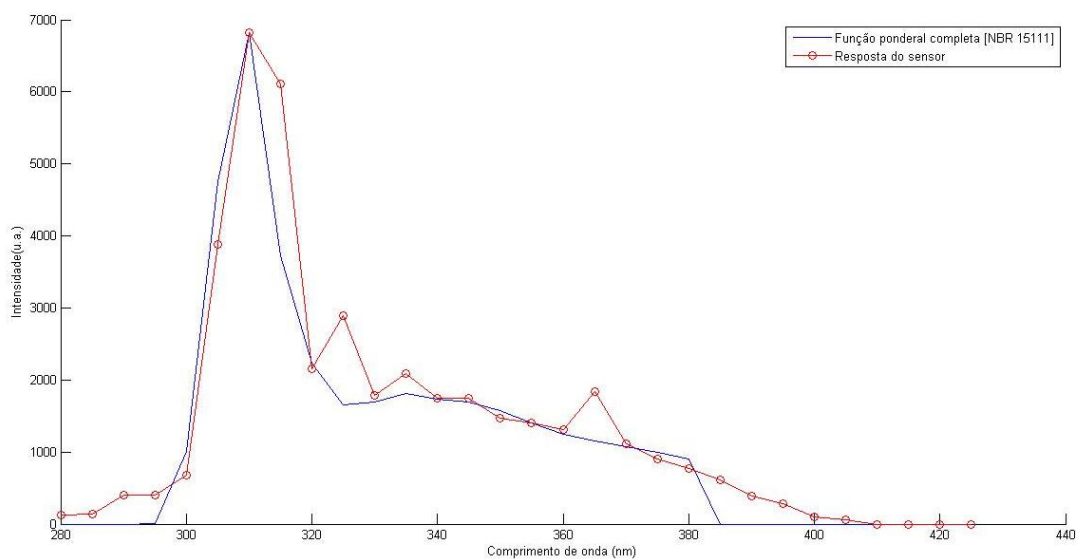
Figura 4-2 Intensidade de radiação E_s do Sol, função característica espectral relativa S e a função ponderal completa é dada pela equação $W = E_s \cdot S$



Fonte: NBR 15.111 (ABNT,2004)

Porém, a resultante do conjunto FONTE + SENSORES, tem que ser a resultante da estabelecida pela NBR 15.111 (ABNT, 2004).

Figura 4-3 Comparação da função ponderação presente na norma com a obtida pelo sistema



Fonte: Autor

Observa-se, na figura 4-2, que a resposta obtida através do conjunto proposto é se aproxima à normalizada. A qualidade do espectro obtido foi quantificada a partir de duas métricas:

- 1) Cálculo do erro quadrático médio (“*root mean square error – RMS*”) usada em muitos estudos (IMAI, ROSEN e BERNIS, 2002) dado pela equação 6.

$$RMS_{ERROR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}(\lambda)_i - y(\lambda)_i)^2}{n}} \quad (6)$$

Onde $\hat{y}(\lambda)$ é a medida do espectro original no comprimento de onda λ ; $y(\lambda)$ é a medida do espectro avaliado no comprimento de onda λ ; e n o número de pontos analisados. O resultado desse cálculo, para uma combinação espectral perfeita, seria zero.

- 2) Determinação do coeficiente de aderência (“*goodness-of-fit coefficient – GFC*”) proposto por Hernández-Andrés (HERNÁNDEZ-ANDRÉS, ROMERO e LEE, 2001) baseado na inequação de Schwartz, descrita pela equação 7:

$$GFC = \frac{|\sum_j R_m(\lambda_j) R_e(\lambda_j)|}{\sqrt{|\sum_j [R_m(\lambda_j)]^2|} \sqrt{|\sum_j [R_e(\lambda_j)]^2|}} \quad (7)$$

Onde $R_m(\lambda_j)$ e $R_e(\lambda_j)$ são, respectivamente, as medidas dos espectros, original e avaliado. Os resultados $GFC \geq 0,999$ são considerados bons (HERNÁNDEZ-ANDRÉS, ROMERO e LEE, 2001).

Os cálculos efetuados apresentaram os valores $RMS_{ERROR} = 0,0913$ e $GFC = 0,9664$ entre os espectros da resposta ponderada do sistema e o normalizado (ABNT, 2004).

4.3 Medidas em Lentes Oftálmicas

Uma das maiores preocupações durante o desenvolvimento do SOMPUOS foi a precisão das medidas. Percebeu-se ao decorrer do projeto que a maior fonte de ruído eram os reatores das lâmpadas fluorescentes. Para contornar esse problema, foram tomadas diversas

medidas de prevenção ao ruído tais como, a utilização de cabos blindados na transmissão dos sinais; blindagem das placas de circuito impressa desenvolvidas; blindagem dos reatores das lâmpadas; entre outras.

Os testes com lentes oftálmicas, testes de repetibilidade das medidas e testes de calibração estão dentro dos padrões estabelecidos pela norma NBR 15.111 (2004) e demonstram a viabilidade de realizar testes no SOMPUOS. Porém, os filtros para calibração serão necessários para a próxima etapa do trabalho, antes de implementá-lo no totem de auto-atendimento.

5 Conclusão

Foi possível o desenvolvimento de um protótipo em bancada para medidas de lentes de sol. Este protótipo será agora implementado no totem de autoatendimento, que encontra-se em exposição para uso público, nas dependências do Departamento de Engenharia Elétrica, da EESC-USP.

O sistema apresenta resolução de 0,1% dentro dos limites estabelecidos pelas normas técnicas nacionais e internacionais que é de 0,5%.

Os amplificadores de transimpedância de dois estágios foram capazes de prover um ganho suficientemente alto para aplicações com fotodiodos. A imunidade do circuito a ruídos externos, avaliada pelas oscilações do sinal de saída, mostrou-se dentro das faixas de tolerância do projeto, devido aos diversos recursos utilizados.

As medidas em lentes de óculos de sol apresentaram fator de correlação entre o sistema desenvolvido e o espectrofotômetro comercial Cary 5000 – VARIAM de $r^2 = 0,9852$.

Aprimoramentos podem ser incorporados ao SOMPUOS no futuro, como substituição das lâmpadas por um conjunto de diodos emissores de luz que se aproxime do espectro normalizado. Isso reduziria o nível de ruído do sistema além de eliminar o sensor de referência, pois LEDs não apresentam flutuação. Porém, não existe atualmente no mercado LEDs à disposição nos comprimentos de onda UVB que cubram a faixa estabelecida por norma.

Referências

ABNT. **Proteção pessoal dos olhos - Óculos de sol e filtros de proteção contra raios solares para uso geral.** [S.l.]. 2004. (NBR 15.111).

CAMERON, M. E. Pterygium Throughout the World. **Thomas**, Springfield, IL, 1965.

CASTRO, S. V. **Anatomia Fundamental.** Rio de Janeiro: Ed. Macgraw-Hill, 1985.

CIE. International lighting vocabulary. **Publication CIE No. 17 (E-11)**, Vienna, 1987.

COGAN, D. G.; KINSEY, V. E. Action Spectrum of Keratitis Produced by Ultraviolet Radiation. **Archives of Ophtalmology**, Boston, 1946.

GRAEME, J. G. **Photodiode Amplifiers: OP AMP Solutions.** [S.l.]: McGraw Hill, 1996.

HECHT, E. **Optics.** New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1990.

HERNÁNDEZ-ANDRÉS, J.; ROMERO, J.; LEE, J. R. L. Colorimetric and spectroradiometric characteristics of a narrow-field-of-view clear skylight in Granada, Spain. **J. Opt. Soc. Am. A**, 18, 02 jan. 2001. 412-420.

HUELSMAN, L. P. **Active and Passive Analog Filter Design - An Introduction.** Singapore: McGraw-Hill, 1993.

ICNIRP. ICNIRP guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation between 100 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). **Health Physics 87(2)**, 2004. 171-186.

IMAI, H.; ROSEN, R.; BERNS, R. S. **Comparative study of metrics for spectral match quality.** CGIV (First European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision). Springfield, Virginia, United States: [s.n.]. 2002. p. 492-496.

INMETRO, 2012. Disponível em:
<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/oculos_sol11UV.pdf>. Acesso em: 23 outubro 2012.

MORAN, D. J.; HOLLOWS, F. C. Pterygium and ultraviolet radiation: a positive correlation. **Br. J. Ophthalmol.** , 1984. 343-346.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos Elétricos**. [S.l.]: LTC, 2003.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

SLINEY, D. H. Physical Factors in Caractogenesis: Ambient Ultraviolet Radiation ans Temperature. **Invest Ophthalmol Vis Sci** 27, 1986. 781-790.

SOBOTTA, J. **Atlas de anatomia humana**. São Paulo: Ed. Guanabara Koogan, 2012.

TAYLOR, H. R. Aetiology of climatic droplet keratopathy and pterygium. **Br. J. Ophthalmol.**, 1980. 154-163.

TAYLOR, H. R. The Biological Effects of UV-B on the Eye. **Photochemistry and Photobiology Vol. 50**, 1989. 489-492.

Apêndice A - Funções Espectrais para o Cálculo da Transmitância do Ultravioleta

Comprimentos de onda (λ) [nm]	Intensidade da radiação espectral solar $E_{S\lambda}$ $10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$	Função de eficácia espectral relativa S	Função de ponderação $W_{\lambda} = E_{S\lambda} \cdot S$
280	0	0,88	0
285	0	0,77	0
290	0	0,64	0
295	$2,09 \cdot 10^{-4}$	0,54	0,00011
300	$8,10 \cdot 10^{-2}$	0,30	0,0243
305	1,91	0,060	0,115
310	11,0	0,015	0,165
315	30,0	0,003	0,090
320	54,0	0,001 0	0,054
325	79,2	0,00050	0,040
330	101	0,00041	0,041
335	128	0,00034	0,044
340	151	0,00028	0,042
345	170	0,00024	0,041
350	188	0,00020	0,038
355	210	0,00016	0,034
360	233	0,00013	0,030
365	253	0,00011	0,028
370	279	0,000093	0,026
375	306	0,000077	0,024
380	336	0,000064	0,022